引用格式:张丽,李胜男,王是尧,等.新型电力系统输电线路故障暂态波形的多维时频特性表征[J].电力科学与技术学报,2025,40(4):24-37.
Citation: ZHANG Li, LI Shengnan, WANG Shiyao, et al. Multi-dimensional time-frequency characterization of fault transient waveforms on transmission lines in new power systems[J]. Journal of Electric Power Science and Technology,2025,40(4):24-37.

新型电力系统输电线路故障暂态波形的多维时频特性表征

张　丽[1],李胜男[1],王是尧[2],许守东[1],鲁晓天[2],唐金锐[2]
(1.南方电网云南电网有限责任公司电力科学研究院,云南 昆明 650011;2.武汉理工大学自动化学院,湖北 武汉 430070)

摘　要:大规模新能源、储能及大容量柔性交直流输电设备广泛接入新型电力系统后,输电线路故障电流和电压波形稳态工频相、序分量将主要取决于电力电子设备低电压穿越策略、紧急控制策略与电子元器件限流环节,传统的基于工频量继电保护算法的性能显著下降。基于非工频暂态分量的新型继电保护算法可充分利用输电线路故障本身引起的暂态充放电过程,识别出区内、外故障。借鉴刻画波形特征的信息论方法,提出基于暂态分量时域波形和频谱分布的幅值及变化率等多维时频特性表征方法,充分挖掘输电线路区内外故障时暂态波形特征差异。研究结果表明,部分时频特性指标在特定时间窗和频率带内受电力电子设备影响小,发生区内、外故障时其差异明显。该表征方法可用于研究和测试新型继电保护算法,为新型电力系统安全与可靠运行提供有力支撑。

关　键　词:电力系统;故障暂态;多维时频;继电保护;新能源
DOI:10.19781/j.issn.1673-9140.2025.04.003　　**中图分类号**:TM773　　**文章编号**:1673-9140(2025)04-0024-14

Multi-dimensional time-frequency characterization of transient waveforms on transmission line faults in new electric power systems

ZHANG Li[1], LI Shengnan[1], WANG Shiyao[2], XU Shoudong[1], LU Xiaotian[2], TANG Jinrui[2]
(1. Electric Power Research Institute, Yunnan Electric Power Grid Co., Ltd., China Southern Power Grid, Kunming 650011, China;
2. School of Automation, Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, China)

Abstract: When large-scale new energy, energy storage, and large-capacity flexible alternative current (AC) and direct current (DC) transmission equipment are integrated into new electric power systems, steady-state power frequency phase, and sequence component of current and voltage waveforms in transmission line faults are mainly depend on the low voltage ride through strategy of power electronic equipment, emergency control strategy, and current limiting link of electronic components and devices. The performance of traditional relay protection algorithms is significantly based on the power frequency. A new relay protection algorithm based on non-power-frequency transient components can make full use of the transient charging and discharging process caused by transmission line faults to distinguish between internal and external faults. Inspired by information-theoretic methods for characterizing waveform features, a multi-dimensional time-frequency characterization approach is proposed, which is based on the amplitude and variation rate of transient components in both the time-domain waveform and spectral distribution. This method fully exploits the differences in transient waveform features between internal and external faults on transmission lines. The research results show that some time-frequency characterization indexes are less affected by the power electronic equipment in the given time window and frequency band, while exhibiting significant differences between internal and external faults. The proposed characterization method can be applied to the study and testing of new relay protection algorithms, providing strong support for the safe and reliable operation of new electric power systems.

Key words: electric power system; fault transient; multi-dimensional time-frequency; relay protection; new energy

收稿日期:2023-12-20;**修回日期**:2024-05-29
基金项目:云南电网公司科技项目计划(YNKJXM20222034)
通信作者:唐金锐(1986—),男,博士,副教授,主要从事电力系统继电保护技术等方面的研究;E-mail:tangjinrui@whut.edu.cn

新型电力系统中的设备故障特性复杂，且其受电力电子设备控制策略影响很大。在新型电力系统中，传统的基于工频量的继电保护装置动作的可靠性、灵敏性、速动性和选择性无法得到有效保障[1-2]。因此，文献[3]提出了基于暂态量或改进工频量的新型继电保护算法，旨在实现新型电力系统故障的可靠检测与隔离。但现有算法验证工作主要基于某些特定仿真模型的故障波形展开，无法验证新型继电保护算法在新型电力系统各场景故障中的适用性[4]。

新型电力系统电源侧以光伏电站和风电场为主，且其在电网侧广泛使用柔性交直流输电设备[5]。当传统电网输电线路发生故障时，在同步发电机的故障电流及序网络阻抗计算中，常认为故障发生后几秒内的机端电压保持不变且正序阻抗约等于负序阻抗。实践证明这一等效设置满足继电保护研究与整定计算要求。

在新型电力系统中，一旦输电线路发生故障，光伏电站、风电场和柔性交直流输电设备均可凭借其灵敏的检测与快速灵活的控制手段，实现毫秒级的响应调节能力，这直接影响到其输出的故障电流与电压特性；同时，考虑到其在电压跌落时采用的低电压穿越策略等紧急控制策略，各类变流器对故障电流和故障电压的影响呈现出复杂的非线性行为特征[6-7]。这改变了工频故障电流和电压在幅值和相位的差异，造成传统电流保护、距离保护和差动保护动作性能下降，甚至可能引发系统发出误动作、拒动作[8]。大量研究结果表明，在新型电力系统输电线路故障期间，光伏和风电并不输出负序故障稳态电流，但在低电压跌落期间，其会输出与电压跌落幅值相关的带限幅的正序故障电流；且双馈风力发电机组在低电压跌落幅度较大时也会采取撬棒保护等紧急控制手段，输出非工频故障电流[9-11]。换而言之，新型电力系统输电线路故障电流和电压与风电场与光伏电站的控制策略紧密相关。除新能源场站侧外，大量的柔性交直流输电设备也广泛采用了各类电力电子装置，其对电网故障输出电流与电压的影响类似于新能源并网控制器的影响，但这些控制策略的差异也会导致不同的故障输出特性[12]。

为解决新型电力系统中输电线路继电保护性能下降问题，国内外众多学者提出了大量改进的电流保护、距离保护和纵联保护等算法。

改进的电流保护算法主要应用于配电网中，其可分为自适应电流保护和暂态电流保护方法 2 类。在自适应电流保护算法中，自适应电流保护方法是先对新能源发电随机性强、网络结构多变的系统运行状态进行提前划界，并预设电流保护整定值，再根据实际运行状态适时调整电流保护整定值[13-14]。该方法简单、可靠，但随着新能源渗透率的快速提高与柔性配电网的推进，实际中其难以提前完成所有运行状态的整定计算。暂态电流保护则是根据系统运行状态，实时计算电流保护的整定值[15]，但是整定计算的实时性尚不足以满足故障后秒级的故障切除的时间要求，该方法存在故障时电流保护无法动作的安全隐患。而基于暂态电流的保护算法主要是基于暂态电流中与故障区内外相关的特征来达到目的，这些特征包括与电力电子设备非线性控制相关的非工频成分[16]、与电源无关的故障线路自身暂态充放电过程导致的时域变化部分等[17]。

传统距离保护算法在新能源送出线路、换流器并网系统内交流线路中的性能迅速下降[18-21]。改进的距离保护算法也可分为 4 大类。第 1 类根据线路两端变流器输出特性导致的两侧工频序分量、相分量在幅值、相位的差异性，改进传统故障回路方程[22-23]，提高距离保护的可靠性；第 2 类利用系统运行状态和部分暂态信息，自适应地调整距离保护的整定值，改善距离保护的性能[24]。随着新能源渗透率的大幅提升，多类型变流器自身控制的差异性及控制策略耦合的复杂性，这 2 类方法已越来越难以满足现场实际应用需求。不同于这 2 类依赖故障产生的工频量的方法，第 3 类方法主要利用变流器主动控制能力下的故障特征来实现区内外的故障检测与判断[25]。第 4 类方法则是通过非工频的暂态时域信息来计算故障距离，以此实现距离保护[26-29]。目前，第 3、4 类方法已成为相关研究的热点。

新能源短路存在电流畸变等故障特性，这些特性使得传统纵联保护算法在区外故障可靠性与区内故障灵敏性之间难以保持平衡。因此，有学者提出了利用线路区内、外故障时线路两端电气量瞬时值估算值与实际值的差异[30]、两端电气量频域分量异同或能量差异[31-32]等指标构建纵联保护新方法。为挖掘线路两侧电气量在区内、外分别故障时的多维时频差异，文献[33-36]还分别基于电流波形相似性、电流变化量相似性、电气量合成图像的辨识算

法，进一步改进了纵联保护算法。

综上所述，仅利用工频量形成的改进的继电保护算法无法满足未来新能源为主体、柔性交直流设备广泛接入的电力系统输电线路保护需求。目前，基于故障后暂态多维时频特征的继电保护算法正逐渐成为研究热点。

在系统的现场试运行期间，单一故障场景无法充分暴露新型继电保护算法缺陷。为有效验证这些新型继电保护算法的有效性与适应性，有必要具体分析新型电力系统故障暂态波形的多维时频特征，提出反映新型电力系统故障时的全面故障参数，为后续新型继电保护方法的测试与改进提供支撑。

1 新型电力系统故障特性分析

传统继电保护方法仅依赖单端或双端电压电流工频量幅值和相位来实现故障检测与判断。虽然新型电力系统输电线路故障工频量受电力电子设备影响，导致其幅值和相位畸变严重，但其故障暂态波形蕴含着丰富的时域与频域故障特征。这为输电线路区内、外故障的辨识提供了有效信息。

不同于传统同步发电机，逆变型电源和双馈型电源在故障期间仅输出正序电流，且其幅值与机端跌落电压、限幅各环节均相关。当电压严重跌落时，电源内部紧急保护策略更会进一步影响故障的输出特性。

在新型电力系统中，故障期间的系统等效负序阻抗远大于正序阻抗，而零序阻抗受变压器中性点接线方式的影响较小[37-38]。在此特性下，新型电力系统与传统交流系统的故障特性存在明显差异。

1.1 逆变型电源输出故障电流分析

光伏电站在输电线路故障发生时刻前、后的控制策略如图1所示。在图1中，光伏电站通过Boost升压电路、DC/AC逆变器、滤波回路实现并网。具体而言，在直流侧：C_1为光伏输出端的并联电容，用于平抑光伏电池输出电压的波动，C_2为直流母线电容，用于平抑Boost电路输出电压的波动。在交流测：使用无缘滤波，该滤波电感为L；光伏电站并网点电压分别为v_a、v_b、v_c，对其进行坐标变换得到dq轴分量e_d、e_q，并网点电流分别为i_a、i_b、i_c，坐标变换后得到d、q轴电流分量i_d、i_q。

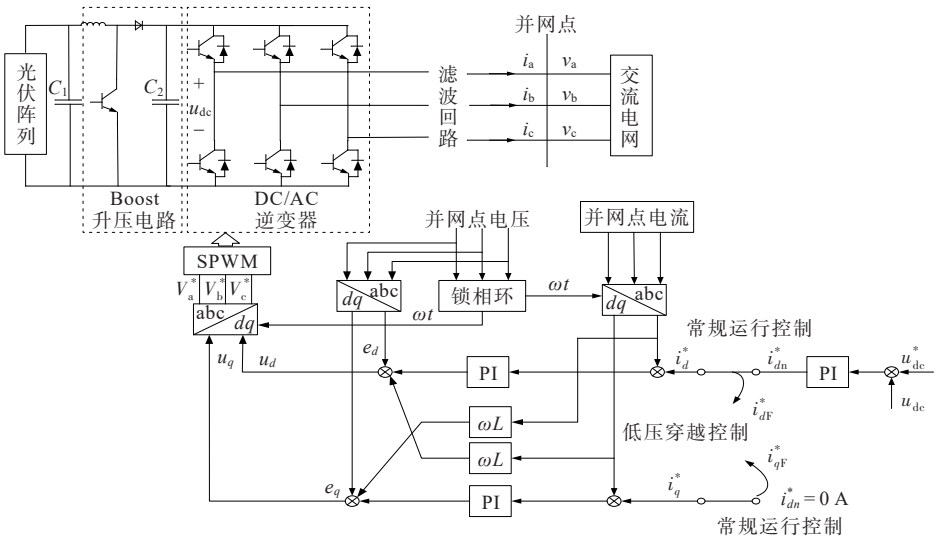


图1 电网故障期间逆变型电源控制策略

Figure 1 Control strategy of inverter-based power sources during grid faults

控制系统获取并网点电压、电流的采样值后，先利用锁相环获取系统角频率ω以生成d、q轴控制变量；再根据外环指令产生电流参考值i_d^*和i_q^*；最后，经过内部解耦控制，产生DC/AC逆变器SPWM环节的参考变量u_d、u_q，变换至三相交流量分别为V_a^*、V_b^*、V_c^*。

逆变器的外环控制在故障发生时刻前、后发生了明显的变化。故障发生前，外环控制环节根据光伏电站阵列输出的直流侧电压u_{dc}和参考值u_{dc}^*，生成内环的d、q轴电流指令值i_{dn}^*和i_{qn}^*；故障后，根据电流限幅要求、电压跌落实际水平、低电压穿越中逆变器无功输出目标函数等，外环控制环节将生成新的内环d、q轴电流指令值i_{dF}^*和i_{qF}^*。逆变器在故障期间输出的a、b、c三相电流$i_{sa1}(t)$、$i_{sb1}(t)$、$i_{sc1}(t)$可

分别简化表示为

$$\begin{cases} i_{sa1}(t)=\sqrt{(i_d^*)^2+(i_q^*)^2}\cos(\omega_1 t+\theta_i+\varphi) \\ i_{sb1}(t)=\sqrt{(i_d^*)^2+(i_q^*)^2}\cos\left(\omega_1 t+\theta_i-\dfrac{2\pi}{3}+\varphi\right) \\ i_{sc1}(t)=\sqrt{(i_d^*)^2+(i_q^*)^2}\cos\left(\omega_1 t+\theta_i+\dfrac{2\pi}{3}+\varphi\right) \end{cases} \tag{1}$$

式中，ω_1 为同步旋转角频率；θ_i 为锁相环测得的故障电流初相位；$\varphi=\arctan(i_q^*/i_d^*)$。

1.2　双馈型电源输出故障电流分析

不同于逆变型电源，对于双馈型电源，除并网逆变器外，转子侧变流器（rotor side converter，RSC）也会通过控制励磁电流影响到故障输出电流，该策略如图 2 所示。在图 2 中，双馈异步风力发电机（doubly fed induction generator，DFIG）并网点的三相电压和三相电流分别为 U_{sabc}、I_{sabc}，这二者先经过 Clark 变换为 $U_{s\alpha\beta}$、$I_{s\alpha\beta}$；再经过 Park 变换依次转度为 d、q 轴下的采样值 U_{sd}、U_{sq}、I_{sd}、I_{sq}。在 DFIG 的转子侧，三相电流为 I_{rabc}，其先经 Clark 变换后变为 $I_{r\alpha\beta}$；再经 Park 变换后变为 I_{rd}、I_{rq}。

DFIG 并网点的三相电压的输出有功功率和无功功率参考值分别为 P_{s0}^* 与 Q_{s0}^*，RSC 输出的实测三相电流为 I_{rabc}，这些一并形成控制 RSC 的 SVPWM 环节的参考变量。一旦交流电网出现故障，将根据低电压穿越等控制目标，重新生成转子电流参考值 I_{rd}^* 与 I_{rq}^*。当电压跌落太大时，为避免 DFIG 中定子与转子中出现过电流，提高 DFIG 低电压穿越能力，系统会直接将撬棒电路短接 RSC，加速衰减转子绕组电流。

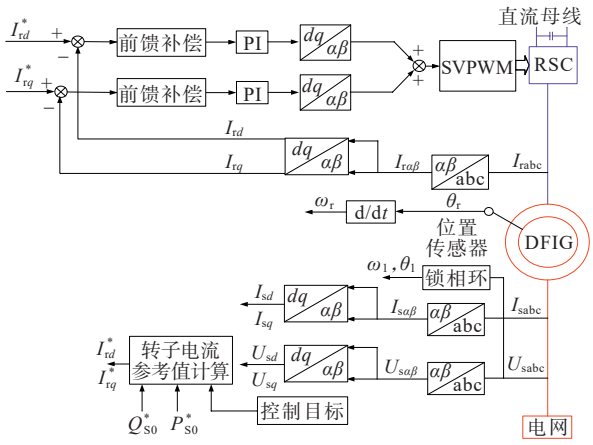


图 2　电网故障期间双馈型电源控制策略框

Figure 2　Block diagram of control strategy of doubly-fed power sources during grid faults

当不投入撬棒电路，仅采用 RSC 控制转子电流进行低压穿越时，该 t 时刻的 DFIG 输出的三相故障电流 $i'_{sa}(t)$、$i'_{sb}(t)$、$i'_{sc}(t)$ 分别表示为

$$\begin{cases} i'_{sa}(t)=I\cos(\omega_1 t+\theta_a+\gamma)-\dfrac{U_{sn}-U_f}{\sigma\omega_1 L_s}e^{-R_s t/L'_s}\sin\theta_a \\ i'_{sb}(t)=I\cos(\omega_1 t+\theta_b+\gamma)-\dfrac{U_{sn}-U_f}{\sigma\omega_1 L_s}e^{-R_s t/L'_s}\sin\theta_b \\ i'_{sc}(t)=I\cos(\omega_1 t+\theta_c+\gamma)-\dfrac{U_{sn}-U_f}{\sigma\omega_1 L_s}e^{-R_s t/L'_s}\sin\theta_c \\ I=\sqrt{(\omega_1 L_m i_{rdf}^*)^2+(\omega_1 L_m i_{rqf}^*+U_f)^2}/(\omega_1 L_s) \\ \gamma=\arctan\left[(\omega_1 L_m i_{rqf}^*+U_f)/\omega_1 L_m i_{rdf}^*\right] \\ \sigma=1-L_m^2/(L_s L_r) \\ L'_s=L_s-L_m^2/L_r \end{cases} \tag{2}$$

式中，θ_a 为故障时刻 A 相定子电压和电流之间的夹角；$\theta_b=\theta_a-2\pi/3$；$\theta_c=\theta_a+2\pi/3$；L_m 为定转子互感；i_{rdf}^*、i_{rqf}^* 分别为故障发生后转子 d、q 电流的参考值；R_s、L_s、L_r、U_{sn}、U_f 分别为定子电阻、定子电感、转子电感、定子绕组额定电压、电压跌落后定子绕组电压；L'_s 为定子折算电感。

当并网点电压跌落程度较深时，风机会启动转子撬棒电路保护，断开转子回路。

当撬棒电路投入时，DFIG 输出的三相故障电流基频分量 $i_{sa,\omega_1}(t)$、$i_{sb,\omega_1}(t)$、$i_{sc,\omega_1}(t)$ 与 DFIG 输出的三相故障电流的转速频率分量 $i_{sa,\omega r}(t)$、$i_{sb,\omega r}(t)$、$i_{sc,\omega r}(t)$ 分别为

$$\begin{cases} i_{sa,\omega_1}(t)=a_{\alpha1}\sin(\omega_1 t)+a_{\alpha2}\cos(\omega_1 t) \\ i_{sb,\omega_1}(t)= \\ \dfrac{\sqrt{3}\,a_{\beta1}-a_{\alpha1}}{2}\sin(\omega_1 t)+\dfrac{\sqrt{3}\,a_{\beta2}-a_{\alpha2}}{2}\cos(\omega_1 t) \\ i_{sc,\omega_1}(t)= \\ -\dfrac{a_{\alpha1}+\sqrt{3}\,a_{\beta1}}{2}(\sin\omega_1 t)-\dfrac{a_{\alpha2}+\sqrt{3}\,a_{\beta2}}{2}\cos(\omega_1 t) \end{cases} \tag{3}$$

$$\begin{cases} i_{sa,\omega r}(t)=e^{-t/\tau_r}\left(a_{\alpha3}\sin(\omega_r t)+a_{\alpha4}\cos(\omega_r t)\right) \\ i_{sb,\omega r}(t)=e^{-t/\tau_r}a_{\alpha3}\sin(\omega_r t-2\pi/3)+ \\ \qquad e^{-t/\tau_r}a_{\alpha4}\cos(\omega_r t-2\pi/3) \\ i_{sc,\omega r}(t)=e^{-t/\tau_r}a_{\alpha3}\sin(\omega_r t+2\pi/3)+ \\ \qquad e^{-t/\tau_r}a_{\alpha4}\cos(\omega_r t+2\pi/3) \end{cases} \tag{4}$$

式（3）、（4）中，$\tau_r=L_r/R_r$ 为转子绕组的衰减时间常数；$a_{\alpha1}$、$a_{\alpha2}$、$a_{\beta1}$、$a_{\beta2}$ 分别为与磁链及转子参数相关的简化计算常数。其具体取值可参考文献[9]。

对比式(2)～(4)可知,当机端电压跌落程度发生变化时,DFIG的故障输出电流特性变化明显。

近年来,区域电力系统的光伏电站装机容量和风电场装机容量在逐年增加,光伏电站和风电场接入电力系统的位置各异,其在各时间段的功率输出随机性强、波动大。一旦电力系统输电线路发生故障,则各光伏电站和风电场将依据自身所处节点电压跌落程度,按式(2)～(4)输出故障电流。

1.3 直流输电换流站输出故障电流分析

以目前控制策略更为复杂的模块化多电平换流器(modular multilevel converter,MMC)形成的柔性直流输电为例,进行直流换流站输出故障电流分析。MMC控制策略及其接入的交流电网拓扑结构如图3所示。在图3中,MMC并网点(point of common coupling,PCC)处监测到的三相电压为$u_{\mathrm{m.abc}}$,三相电流为$i_{\mathrm{m.abc}}$;MMC直流侧电压为u_{dc};MMC外环控制环节根据并网点交互的有功功率P和无功功率Q,生成内环控制环节在d轴和q轴的正序参考值分别为$I^*_{\mathrm{m}.d+}$、$I^*_{\mathrm{m}.q+}$;故障发生后,还须抑制负序电流的不利影响,因此还会产生内环控制环节在d轴和q轴的负序参考值$I^*_{\mathrm{m}.d-}$、$I^*_{\mathrm{m}.q-}$。

1.3.1 对称性故障

从图3中可以看出,MMC采用功率外环加电流内环的双闭环控制,在同步旋转坐标系下,功率外环控制器根据有功功率P、直流电压u_{dc}输出正序轴电流参考值根据无功功率、交流电压$U_{\mathrm{m}+}$输出正序q轴电流参考值$I^*_{\mathrm{m}.q+}$。锁相环(phase locked loop,PLL)用于获得PCC电压的实时相位。电流内环控制器根据电流参考值输出对应的桥臂差模电压参考值$U^*_{\mathrm{diff}.d+}$、$U^*_{\mathrm{diff}.q+}$、$U^*_{\mathrm{diff}.d-}$、$U^*_{\mathrm{diff}.q-}$,对正、负序电流分别进行控制。正常运行时,正序电流内环控制器将功率外环控制器输出的d、q轴电流参考值作为输入,负序电流内环控制器的电流参考值为0 A。该差模电压参考值经过合成得到调制电压$u^*_{\mathrm{diff.abc}}$,通过最近电平逼近调制(nearest level modutation,NLM)生成开关信号以控制每个子模块的投切状态。

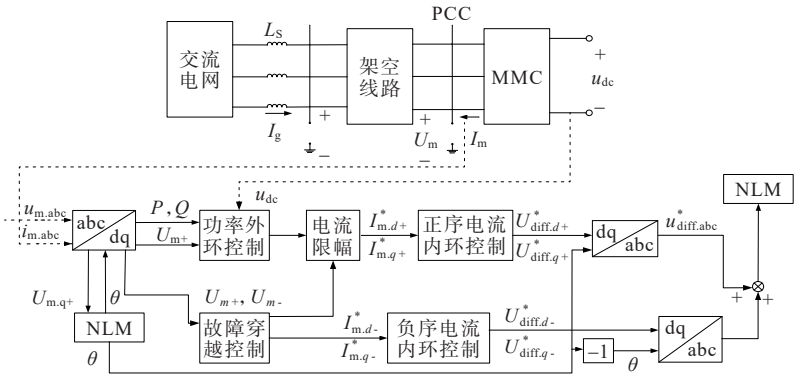


图3 MMC控制策略及其接入的交流电网拓扑结构

Figure 3 Control strategy of MMC and topology structure of connected AC grids

在图3中,当交流侧电网发生对称故障时,由于并网点测得的相位会发生偏移,所以可得此时MMC故障电压电流关系在dq轴坐标系的数学式:

$$\begin{cases} U_{\mathrm{s}+}\sin(\delta-\Delta\theta)= \\ r_{\mathrm{s}}I_{\mathrm{g}.d+}-x_{\mathrm{s}}I_{\mathrm{g}.q+}+R_{\mathrm{g}}\left(I_{\mathrm{g}.d+}+I^*_{\mathrm{m}.d+}\right) \\ U_{\mathrm{s}+}\cos(\delta-\Delta\theta)= \\ r_{\mathrm{s}}I_{\mathrm{g}.q+}+x_{\mathrm{s}}I_{\mathrm{g}.d+}+R_{\mathrm{g}}\left(I_{\mathrm{g}.q+}+I^*_{\mathrm{m}.q+}\right) \\ U_{\mathrm{m}.d+}=R_{\mathrm{g}}\left(I_{\mathrm{g}.d+}+I^*_{\mathrm{m}.d+}\right)+r_{\mathrm{m}}I^*_{\mathrm{m}.d+}-x_{\mathrm{m}}I^*_{\mathrm{m}.q+} \\ R_{\mathrm{g}}\left(I_{\mathrm{g}.q+}+I^*_{\mathrm{m}.q+}\right)+r_{\mathrm{m}}I^*_{\mathrm{m}.q+}+x_{\mathrm{m}}I^*_{\mathrm{m}.d+}=0 \end{cases} \tag{5}$$

式中,$U_{\mathrm{s}+}$为同步发电机正序电压;$U_{\mathrm{m}.d+}$、$U_{\mathrm{m}.q+}$分别为NLM输出电压U_{m}的d、q轴正序电压;δ为故障前锁相环测得的相位差;$\Delta\theta$为故障前、后PCC测得的相位角变化值;$I_{\mathrm{g}.d+}$、$I_{\mathrm{g}.q+}$分别为电网侧向故障点输出电流I_{g}的d、q轴正序分量;$I^*_{\mathrm{m}.d+}$、$I^*_{\mathrm{m}.q+}$分别为MMC向故障点输出电流I_{m}的d、q轴正序分量;r_{s}、x_{s}、r_{m}、x_{m}分别为电网侧、MMC侧到故障点的电阻和阻抗;R_{g}为故障点的过渡电阻。

因此,当测量得到PCC电压相位变化为$\Delta\theta$时,即可根据式(5)计算,得到PCC电压d轴分量$U_{\mathrm{m}.d+}$,从而计算出故障输出的电压和电流。

1.3.2 不对称性故障

当交流电网发生不对称故障时,MMC输出的故障电流将包含负序分量且其幅值与低压穿越期间控制策略有关。以发生BC相间短路故障为例,设相间过渡电阻为R_{arc},当负序d、q轴电流参考值不为0 A时,MMC输出负序电流的相位也与PCC电压有关。故障稳态时,其在dq坐标系下可表示为

$$\begin{cases} U_{s+}\cos(\delta-\Delta\theta)-r_s I_{g.d+}+x_s I_{g.q+}- \\ r_s I_{g.d-}-x_s I_{g.q-}=R_{arc}\left(I_{g.d+}+I^*_{m.d+}\right) \\ U_{s+}\sin(\delta-\Delta\theta)-r_s I_{g.q+}-x_s I_{g.d+}+ \\ r_s I_{g.q-}-x_s I_{g.d-}=R_{arc}\left(I_{g.q+}+I^*_{m.q+}\right) \\ I_{g.d+}+I^*_{m.d+}+I_{g.d-}+I^*_{m.d-}=0 \\ I_{g.q+}+I^*_{m.q+}=I_{g.q-}+I^*_{m.q-} \\ U_{m.d+}=U_{s+}\cos(\delta-\Delta\theta)-r_s I_{g.d+}+ \\ x_s I_{g.q+}+r_m I^*_{m.d+}-x_m I^*_{m.q+} \\ U_{s+}\sin(\delta-\Delta\theta)-r_s I_{g.q+}-x_s I_{g.d+}+ \\ r_m I^*_{m.q+}+x_m I^*_{m.d+}=0 \end{cases} \tag{6}$$

式中，$I_{g.d-}$、$I_{g.q-}$分别为电网侧向故障点输出电流的d、q轴负序分量；$I^*_{m.d-}$、$I^*_{m.q-}$分别为MMC向故障点输出电流的d、q轴负序分量。

同理，经测量得到PCC电压相位变化$\Delta\theta$后，可以计算PCC正序电压的d轴分量$U_{m.d+}$，从而计算出交流线路故障时MMC输出的电压和电流。

2　故障暂态波形的多维时频特性表征方法

2.1　输电线路区内外故障暂态分析

输电线路发生区内或区外故障时，这种逆变型电源、双馈型电源和直流输电换流站均会输出故障电流。按目前的低电压穿越规程规范的一般性要求，在故障发生时刻的2 s内，电力电子设备应具备一定的不脱网连续运行能力。也就是说，故障发生后2 s内，输电线路两端监测到的电流电压均处于波动过程中[39]。而电力电子装置对所给定控制目标的自身调节过渡过程非常短暂[40]。因此，可将输电线路故障后的时域过程划分为输电线路自身充放电过程影响的故障暂态过程（几毫秒）、电力电子装置动态调节下的故障暂态过程（几毫秒到几十毫秒）、电力电子装置低电压穿越控制下的故障稳态过程（几十毫秒至数秒）共3个阶段。该区内故障时的输电线路等效模型如图4所示。

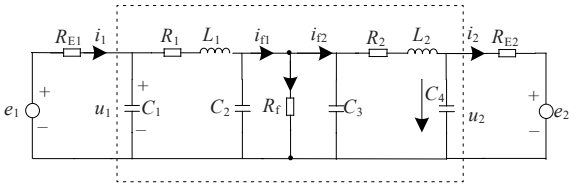


图4　区内故障时的输电线路等效模型

Figure 4　Equivalent transmission line model with internal faults

本文仅对故障后几毫秒内输电线路自身充放电过程影响的故障暂态过程进行分析。在图4中，虚线框内的输电线路发生区内故障，故障过渡电阻为R_f；该输电线路左侧的系统等效电势和等效阻抗分别为e_1和R_{E1}；右侧的系统等效电势和等效阻抗分别为e_2和R_{E2}；i_{f1}、i_{f2}分别为故障点两侧流过输电线路的短路电流；左侧监测到的电压、电流分别为u_1、i_1；右侧监测到的电压、电流分别为u_2、i_2。因故障发生在输电线路内，将该输电线路位于故障点左侧的部分等效为一个“π”等值电路，该“π”等值电路的等效电阻为R_1，等效电感为L_1，左右两点的等效电容为C_1和C_2；将该输电线路位于故障点右侧的部分等效为一个“π”等值电路，该“π”等值电路的等效电阻为R_2，等效电感为L_2，左、右两点的等效电容分别为C_3和C_4。

在此条件下，输电线路发生内部故障时，u_1、i_1、u_2、i_2应满足

$$\begin{cases} u_{C_2}=u_1-i_1R_1-R_1C_1\dfrac{\mathrm{d}u_1}{\mathrm{d}t}-L_1\dfrac{\mathrm{d}\left(i_1-C_1\dfrac{\mathrm{d}u_1}{\mathrm{d}t}\right)}{\mathrm{d}t} \\ u_{C_3}=u_2-i_2R_2-R_2C_4\dfrac{\mathrm{d}u_2}{\mathrm{d}t}-L_2\dfrac{\mathrm{d}\left(i_2-C_4\dfrac{\mathrm{d}u_2}{\mathrm{d}t}\right)}{\mathrm{d}t} \\ i_{f1}=i_1-C_1\dfrac{\mathrm{d}u_1}{\mathrm{d}t}-C_2\dfrac{\mathrm{d}u_{C_2}}{\mathrm{d}t} \\ i_{f2}=i_2-C_4\dfrac{\mathrm{d}i_2}{\mathrm{d}t}-C_3\dfrac{\mathrm{d}i_{C_3}}{\mathrm{d}t} \end{cases} \tag{7}$$

式中，u_{C_2}、u_{C_3}分别为2个电容C_2和C_3两端的电压；i_f为流过过度电阻R_f的短路电流。

由故障的初始条件，可推得故障边界条件：

$$\begin{cases} u_{C_2}=u_{C_3}=i_fR_f \\ i_{f1}-i_{f2}=i_f \\ e_1=u_1+i_1R_{E1} \\ e_2=u_2-i_2R_{E2} \end{cases} \tag{8}$$

联立式(7)、(8)，即可计算得出输电线路内部发生故障时两端口的电压与电流值。

当故障发生在该输电线路区外时，故障等值模型如图5所示。在图5中，输电线路的区内部分可等效为一个“π”等值电路，该“π”等值电路的等效电阻为R_1+R_2，等效电感为L_1+L_2，左右两点的等效电容为C_1+C_2和C_3+C_4。区外故障发生位置与该输电线路右侧间的线路也可等效为一个“π”等值电路，该“π”等值电路的等效电阻为R_5，等效电感为L_5，左、右两点的等效电容分别为C_5和C_6。

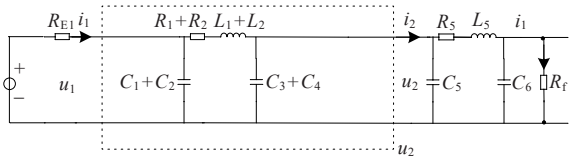


图 5 区外故障时的输电线路等效模型

Figure 5 Equivalent transmission line model with external faults

从图 5 中可以看出，该两端故障信息的表达关系式应为

$$\begin{cases} u_{C_1+C_2}=u_1 \\ u_{C_3+C_4}=u_2=u_1-i_1(R_1+R_2)-(R_1+R_2)(C_1+C_2)\dfrac{\mathrm{d}u_1}{\mathrm{d}t}-(L_1+L_2)\dfrac{\mathrm{d}\left(i_1-(C_1+C_2)\dfrac{\mathrm{d}u_1}{\mathrm{d}t}\right)}{\mathrm{d}t} \\ i_2=i_1-(C_1+C_2)\dfrac{\mathrm{d}u_1}{\mathrm{d}t}-(C_3+C_4)\dfrac{\mathrm{d}u_{C_3+C_4}}{\mathrm{d}t} \end{cases} \tag{9}$$

式中，$u_{C_1+C_2}$ 为左侧值为 C_1+C_2 的等效电容的电压；$u_{C_3+C_4}$ 为右侧值为 C_3+C_4 的等效电容的电压。

由故障的初始条件，推得故障边界条件：

$$\begin{cases} e_1=u_1+i_1R_{E1} \\ u_2=i_2R_5-R_5C_5\dfrac{\mathrm{d}u_2}{\mathrm{d}t}+L_5\dfrac{\mathrm{d}\left(i_2-C_5\dfrac{\mathrm{d}u_2}{\mathrm{d}t}\right)}{\mathrm{d}t}+i_fR_f \end{cases} \tag{10}$$

联立式(9)、(10)，可计算得出输电线路外部发生故障时线路两端口的电压与电流表达式。

由此可见，区内外发生故障时，输电线路两端电压和电流的时域表达式存在明显区别，可用之来区分区内、外故障。如果考虑到输电线路自身参数的频变影响，还可在频域上进行对比分析。这些分析为区内、外故障时输电线路多维时频故障特征差异提供了理论支撑。

2.2 现代故障信号分析与处理

图 6 展示了现有电力系统故障信号的分析与处理方法。从图 6 中可以看出，这些方法主要包括去噪等信号处理方法、故障特征提取方法、故障诊断方法和故障预测等方法[41-43]。整体来看，这些信号分析与处理方法主要从时域和频域 2 个方向展开，在对信号刻划角度也主要从幅值与幅值变化率 2 个角度展开。

据此，本文采用特征统计的信号处理方法提出故障暂态的 26 维特征数据用于分析输电线路故障时的暂态时频特性。

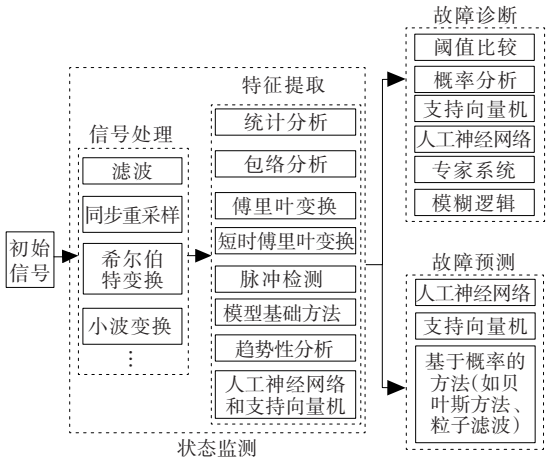


图 6 信号分析技术

Figure 6 Signal analysis techniques

2.3 故障暂态波形的多维时频特性表征方法

安装在配电线路各监测点处的 H 台配电自动化终端以采样率 f_s 进行三相电流、三相电压的连续采样，在检测并标定故障发生时刻 t_f 后，保存故障发生时刻后 Δt 以及故障发生时刻前一个周波 T 时间内的三相电流和电压采样数据。

编号为 $h(h=1,2,\cdots,H)$ 的继电保护装置的 $m(m=1,2,3)$ 相电流在故障时刻 t_f 后的第 $k(k=1,2,\cdots,n)$ 个采样数据记为 $i_{h,m,k}$，则滤除相电流中正常运行时的工频分量和谐波分量，得到的三相电流暂态分量 $x_{h,m,k}$ 为

$$x_{h,m,k}=i_{h,m,k}-i_{h,m,k-Tf_s} \tag{11}$$

所得到的故障后 Δt 时间内的每相电流暂态分量为 $x_{h,m,k}$，其可组成故障分量数组，则该数组中的元素总数为 $n=\Delta t\cdot f_s$。

2.3.1 相电流波形采样数组多维时频特征提取

对相电流暂态分量波形采样数组进行多维时频特征提取。统计学参数中的集中趋势特征（最小值、最大值、平均值）、离散趋势特征（标准差、方差、均方根值）、分布形状特征（偏度、峭度、峭度因子）等均能够对其数据特征进行表征。

借鉴信息领域的最新研究成果，提出对相电流暂态分量时域内的波形采样数组以及相应的频谱变换数组进行各 13 维特征的提取，包括时域内和频域内的所得序列数组的平均值、标准差、偏度、峭度、最大值、最小值、峰峰值、均方根、振幅因数、波形因数、冲击因数、裕度因数、波形能量。

将第 h 台新型继电保护装置采集的电流数据中长度为 n 的故障相波形采样数组经离散傅里叶变

换，设变换后第 k 个频点处的频谱幅值为 $y_{h,m,k}$，变换式如式(11)所示，该数组元素总数 $N=n$，则有

$$y_{h,m,k}=\sum_{i=1}^{n}x_{h,m,i}W_N^{(i-1)(k-1)} \tag{12}$$

式中，$x_{h,m,i}$ 为编号为 h 的继电保护装置的 m 相电流在故障时刻 t_f 后的第 i 个采样数据中的暂态分量，$m\in\{A,B,C\}$；W_N 为傅里叶变换中的旋转因子，$W_N^{(i-1)(k-1)}=\mathrm{e}^{(-2\lambda j)(i-1)(k-1)/N}$。

根据这些分析结果，形成编号 h 的继电保护装置的相电流时频域故障特征。其时域平均值 $X_{h,m,1}$ 和频域平均值 $F_{h,m,1}$ 的平均值分别为

$$\begin{cases}X_{h,m,1}=\dfrac{1}{n}\sum\limits_{i=1}^{n}x_{h,m,i}\\ F_{h,m,1}=\dfrac{1}{N}\sum\limits_{k=1}^{N}y_{h,m,k}\end{cases} \tag{13}$$

时域标准差 $X_{h,m,2}$ 和频域标准差 $F_{h,m,2}$ 为

$$\begin{cases}X_{h,m,2}=\sqrt{\dfrac{1}{n}\sum\limits_{i=1}^{n}\left(x_{h,m,i}-X_{h,m,1}\right)^2}\\ F_{h,m,2}=\sqrt{\sum\limits_{k=1}^{N}\left(f_k-S_{h,m,1}\right)^2y_{h,m,k}\Big/\sum\limits_{k=1}^{N}y_{h,m,k}}\\ f_k=k\dfrac{f_s}{N}\\ S_{h,m,1}=\dfrac{\sum\limits_{k=1}^{N}f_ky_{h,m,k}}{\sum\limits_{k=1}^{N}y_{h,m,k}}\end{cases} \tag{14}$$

式中，f_k 为第 k 条谱线的频率；$S_{h,m,1}$ 为质心频率。

时域均方根 $X_{h,m,3}$ 和频率均方根 $F_{h,m,3}$ 为

$$\begin{cases}X_{h,m,3}=\sqrt{\dfrac{1}{n}\sum\limits_{i=1}^{n}x_{h,m,i}^2}\\ F_{h,m,3}=\sqrt{\sum\limits_{k=1}^{N}f_k{}^2y_{h,m,k}\Big/\sum\limits_{k=1}^{N}y_{h,m,k}}\end{cases} \tag{15}$$

时域最大值 $X_{h,m,4}$ 和频率最大值 $F_{h,m,4}$ 为

$$\begin{cases}X_{h,m,4}=\max\left\{x_{h,m,i}\right\},\ 1\leqslant i\leqslant n\text{(时域)}\\ F_{h,m,4}=\max\left\{y_{h,m,k}\right\},\ 1\leqslant k\leqslant N\text{(频域)}\end{cases} \tag{16}$$

时域最小值 $X_{h,m,5}$ 和频率最小值 $F_{h,m,5}$ 为

$$\begin{cases}X_{h,m,5}=\min\left\{x_{h,m,i}\right\},\ 1\leqslant i\leqslant n\text{(时域)}\\ F_{h,m,5}=\min\left\{y_{h,m,k}\right\},\ 1\leqslant k\leqslant N\text{(频域)}\end{cases} \tag{17}$$

时域峰峰值 $X_{h,m,6}$ 和频率峰峰值 $F_{h,m,6}$ 为

$$\begin{cases}X_{h,m,6}=X_{h,m,4}-X_{h,m,5}\text{(时域)}\\ F_{h,m,6}=F_{h,m,4}-F_{h,m,5}\text{(频域)}\end{cases} \tag{18}$$

时域偏度因数 $X_{h,m,7}$ 和频率偏度因数 $F_{h,m,7}$ 为

$$\begin{cases}X_{h,m,7}=\sum\limits_{i=1}^{n}\left(x_{h,m,i}-X_{h,m,1}\right)^3\Big/nX_{h,m,2}^3\text{(时域)}\\ F_{h,m,7}=\sum\limits_{k=1}^{N}\left(y_{h,m,k}-F_{h,m,1}\right)^2\Big/F_{h,m,2}^3\text{(频域)}\end{cases} \tag{19}$$

时域峭度因数 $X_{h,m,8}$ 和频率峭度因数 $F_{h,m,8}$ 为

$$\begin{cases}X_{h,m,8}=\sum\limits_{i=1}^{n}\left(x_{h,m,i}-X_{h,m,1}\right)^4\Big/nX_{h,m,2}^4\text{(时域)}\\ F_{h,m,8}=\sum\limits_{k=1}^{N}\left(y_{h,m,k}-F_{h,m,1}\right)^4\Big/S_{h,m,2}\text{(频域)}\\ S_{h,m,2}=\dfrac{\sum\limits_{k=1}^{N}\left(f_k-S_{h,m,1}\right)^2y_{h,m,k}}{\sum\limits_{k=1}^{N}y_{h,m,k}}\end{cases} \tag{20}$$

式中，$S_{h,m,2}$ 为频率方差。

时域峰值因数 $X_{h,m,9}$ 和频率峰值因数 $F_{h,m,9}$ 为

$$\begin{cases}X_{h,m,9}=X_{h,m,4}/X_{h,m,3}\text{(时域)}\\ F_{h,m,9}=F_{h,m,4}/F_{h,m,3}\text{(频域)}\end{cases} \tag{21}$$

时域波形因数 $X_{h,m,10}$ 和频率波形因数 $F_{h,m,10}$ 为

$$\begin{cases}X_{h,m,10}=X_{h,m,3}\Big/\dfrac{1}{n}\sum\limits_{i=1}^{n}\left|x_{h,m,i}\right|\text{(时域)}\\ F_{h,m,10}=F_{h,m,3}\Big/\dfrac{1}{N}\sum\limits_{k=1}^{N}y_{h,m,k}\text{(频域)}\end{cases} \tag{22}$$

时域冲击因数 $X_{h,m,11}$ 和频率冲击因数 $F_{h,m,11}$ 为

$$\begin{cases}X_{h,m,11}=X_{h,m,4}\Big/\dfrac{1}{n}\sum\limits_{i=1}^{n}\left|x_{h,m,i}\right|\text{(时域)}\\ F_{h,m,11}=F_{h,m,4}/F_{h,m,1}\text{(频域)}\end{cases} \tag{23}$$

时域裕度因数 $X_{h,m,12}$ 和频率裕度因数 $F_{h,m,12}$ 为

$$\begin{cases}X_{h,m,12}=\max\left(\left|x_{h,m,i}\right|\right)\Big/\left(\dfrac{1}{n}\sum\limits_{i=1}^{n}\sqrt{\left|x_{h,m,i}\right|}\right)^2\text{(时域)}\\ F_{h,m,12}=\max\left(y_{h,m,k}\right)\Big/\left(\dfrac{1}{N}\sum\limits_{k=1}^{N}\sqrt{y_{h,m,k}}\right)^2\text{(频域)}\end{cases} \tag{24}$$

时域能量 $X_{h,m,13}$ 和频率能量 $F_{h,m,13}$ 为

$$\begin{cases}X_{h,m,13}=\sum\limits_{i=1}^{n}x_{h,m,i}^2\text{(时域)}\\ F_{h,m,13}=\sum\limits_{k=1}^{N}y_{h,m,k}^2\text{(频域)}\end{cases} \tag{25}$$

将所得 m 相电流暂态分量时域特征进行组合，形成13维相电流暂态分量时域特征数组。其中，第 i 个元素为 $X_{h,m,i}$。类似地，将所得的 m 相电流暂态分量频域特征组成为13维频域特征数组，第 k 个元素为 $F_{h,m,k}$。

将同样的方法应用于新型电力系统三相暂态电压的分析，可得到编号为 h 的新型继电保护装置 m 相（A 相、B 相、C 相）电压暂态分量时域特征进行组合，形成 13 维相电压暂态分量时域特征数组，第 i 个元素为 $U_{h,m,j}$；同理，将所得的 m 相电压暂态分量频域特征组成为 13 维频域特征数组，第 k 个元素为 $H_{h,m,k}$。

3 仿真分析

本文以新能源场站送出线路故障时的暂态波形多维时频特性表征为例对该算例进行说明，其拓扑结构如图 7 所示。在图 7 中，110 kV 的 1#线路与 2#线路均为 30 km 架空线路，故障点 f_1、f_2、f_3、f_4 分别设置在 110 kV 线路距 C_1 测量点 25 km 处、110 kV 的 2#线路左端、中间 15 km 处以及线路右端。C_2 测量点为新能源汇集母线经升压变后的 110 kV 的 2#线路右端。

本文所搭建的模型中，新能源汇集母线变压器最大额定容量将限制在 50 MV·A 以内，故把新能源系统的送出功率设定约在 40 MW。

仅依据新能源装机容量还无法表征以新能源为主体的新型电力系统故障特征。事实上，传统交流电力系统网络某点的短路容量等于该点三相短路电流与额定电压的乘积，是系统强度的一个标志。借鉴传统直流系统稳定分析中的短路比（short circuit ratio，SCR）概念来量化新能源接入对短路电流的影响程度，将其定义为新能源并网点短路容量与新能源出力的比值，即

$$V_{\mathrm{SCR}}=\frac{S_{\mathrm{pcc}}}{P_{\mathrm{N}}} \tag{26}$$

式中，V_{SCR} 为 SCR 的数值；S_{pcc} 为并网点三相短路容量，该值不计入新能源场站对短路电流的影响；P_{N} 为正常运行时新能源装机容量。

有研究表明，当 V_{SCR} 为[1.5，2.5]时，该系统为“弱”系统[44]。故设定 $V_{\mathrm{SCR}}=2.5$，即此时新能源场站集中接入点 C_2 的系统短路容量为 100 MW。

分析不同故障点 f_1、f_2、f_3、f_4 下不同故障类型（三相短路、相间短路、两相短路、单相接地短路）以及不同故障电阻的三相电压电流波形。为方便后文对波形进行暂态特征分析，时间窗采用故障前 5 ms 至故障后 40 ms 的三相电压电流波形以及三相电流电压故障分量波形。设定新能源渗透率为 50%，即在新能源出力约为 40 MW 时，系统 110 kV 下负荷在 80 MW。

通过对文 2.2 光伏发电系统接入下的新型电力系统测量点电流故障分量波形进行高维时频暂态特征提取，其在某个故障类型下的三相电流分量特征，取 C_1 检测点 26 维特征为例进行说明，结果见表 1。

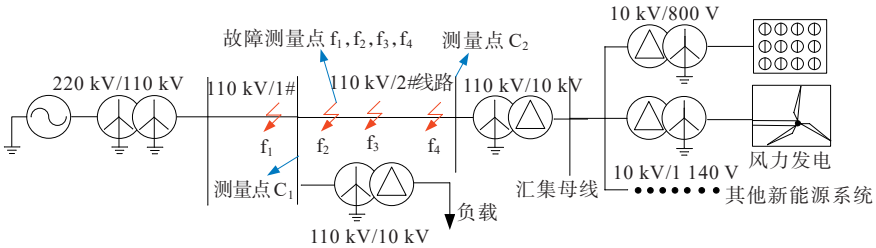


图 7 新能源场站送出线路拓扑

Figure 7 Topology of transmission lines for new energy field stations

图 8、9 分别为该输电线路区内发生单相接地故障，且故障电阻从 0.01 Ω 变化至 2 000 Ω 的情况下，C_1 处测得的电流故障分量 13 维时域和 13 维频域特征幅值范围。

时频域特征经过归一化之后不同特征幅值区间有很大区别。正常无故障时相电流的故障分量为 0，所以 26 维度的特征幅值都是 0。可以看出，在故障情况下，时域和频域中总会有特征出现较明显的变化。其中除了传统方法所用的最大值、平方根、峰峰值等信息，频域中的裕度因数出现不同于正常状态的明显的幅值范围变化。该维度分量即可以为单相接地故障检测信息使用。

图 10、11 分别为区内、外都发生单相接地故障，且故障接地电阻从 0.01～2 000 Ω 条件下，C_1 处测得的故障电流故障分量的多维时频特征的区别。

在区内、外故障所产生的故障分量分解为 26 维时频特征后，在偏度，峭度，冲击因数等维度存在明显的幅值区间范围差异，可以利用这些维度的区间直接分辨故障位置。而最大值、最小值、能量、均方根等幅值范围上有差异，可以作其各故障特征的最大幅值范围，来判断是否为区外故障。

表 1　C_1检测点 26 维特征区内置信区间

Table 1　Confidence intervals within 26-dimensional feature areas at C_1 detection point

不同相	时域平均值/A		时域标准差/A		时域偏度/A		时域峭度/A		时域最大值/A		时域最小值/A		时域峰峰值/A	
	最大值	最小值	最大值	最小值	最大值	最小值	最大值	最小值	最大值	最小值	最大值	最小值	最大值	最小值
A 相	9.308	0.118	120.954	1.408	13.037	11.563	178.624	150.441	1 878.675	23.274	−14.349	−653.670	2 532.345	38.140
B 相	−0.021	−2.826	36.072	0.256	−7.079	−13.110	362.308	148.289	91.328	1.970	−4.981	−557.148	648.476	6.951
C 相	0.045	−2.788	36.063	0.236	11.334	−13.108	258.043	155.524	104.500	4.992	−2.566	−560.689	664.637	7.558

不同相	时域均方根/A		时域振幅因数/A		时域波形因数/p.u.		时域冲击因数/p.u.		时域裕度因数/p.u.		时域能量/A^2		频域平均值/A	
	最大值	最小值	最大值	最小值	最大值	最小值	最大值	最小值	最大值	最小值	最大值	最小值	最大值	最小值
A 相	121.309	1.413	16.468	14.518	11.974	10.543	182.704	162.007	1 295.351	17.768	297 000 000	40 345.380	0.433	0.004
B 相	36.182	0.257	25.100	2.519	11.967	9.832	282.124	30.114	5 407.085	9.991	26 445 253	1 341.972	0.127	0.001
C 相	36.170	0.237	24.419	2.873	12.228	10.091	284.701	34.384	8 990.722	11.373	26 428 054	1 142.308	0.124	0.001

不同相	频域标准差/A		频域偏度/A		频域峭度/A		频域最大值/A		频域最小值/A		频域峰峰值/A	
	最大值	最小值	最大值	最小值	最大值	最小值	最大值	最小值	最大值	最小值	最大值	最小值
A 相	1.651	0.019	9.389	8.851	95.414	86.518	18.617	0.237	0.048	0.000 004 51	18.614	0.237
B 相	0.492	0.003	9.679	2.461	109.476	10.082	5.652	0.042	0.018	0.000 002 03	5.639	0.042
C 相	0.493	0.003	9.268	3.887	99.286	21.995	5.577	0.040	0.016	0.000 001 75	5.561	0.040

不同相	频域均方根/A		频域振幅因数/p.u.		频域波形因数/p.u.		频域冲击因数/p.u.		频域裕度因数/p.u.		频域能量/A^2	
	最大值	最小值	最大值	最小值	最大值	最小值	最大值	最小值	最大值	最小值	最大值	最小值
A 相	1.707	0.019	11.944	10.903	4.908	3.939	58.328	42.959	10 493.190	99.131	58 863.520	7.989
B 相	0.509	0.003	13.498	5.158	4.707	1.508	55.200	7.778	22 079.310	346.538	5 236.684	0.265
C 相	0.508	0.003	12.005	6.259	4.851	1.748	53.893	11.053	19 575.350	360.905	5 233.278	0.226

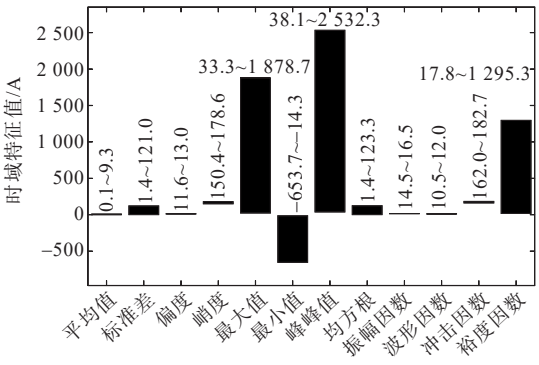


图 8　区内故障时 C_1 处故障电流时域特征

Figure 8　Time-domain features of fault current at C_1 with internal faults

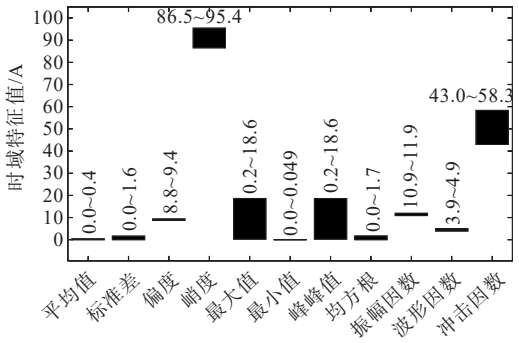
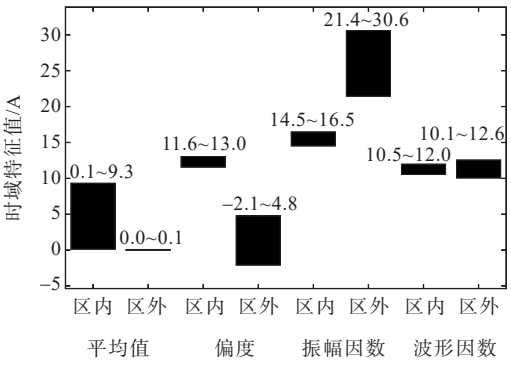
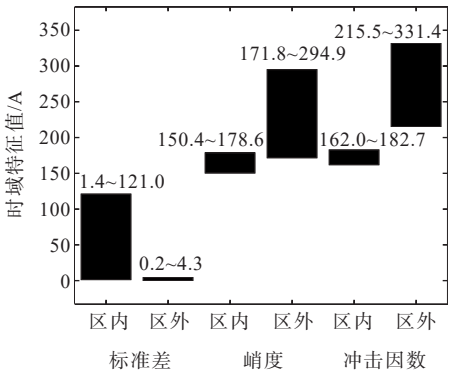


图 9　区内故障时 C_1 处故障电流频域特征

Figure 9　Frequency domain features of fault current at C_1 with internal faults



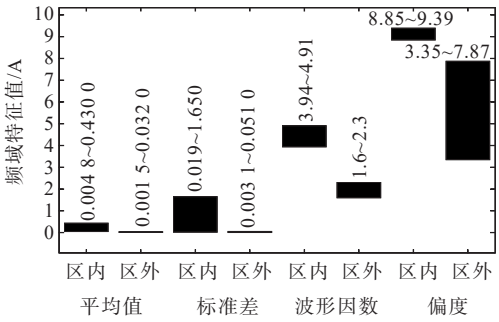
(a) 分布范围小的特征值



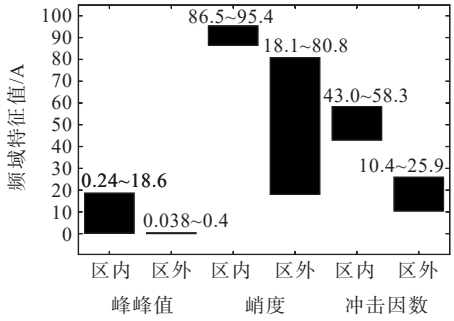
(b) 分布范围大的特征值

图 10　区内和区外故障 C_1 处故障电流时域特征对比

Figure 10　Comparison of time-domain features of fault current at C_1 with internal and external faults



(a) 分布范围小的特征值



(b) 分布范围大的特征值

图 11 区内外故障 C_1 处故障电流频域特征对比

Figure 11 Comparison of frequency-domain features at C_1 with internal and external faults

4 结语

本文提出了一种新型电力系统故障暂态波形的多维时频特性表征框架。借鉴信息理论中的统计学表征方法，从时域和频域构建了 26 维表征新型电力系统输电线路故障下暂态波形的多维时频特征，避免了传统继电保护装置仅采用基于工频量算法受电力电子装置低电压穿越等控制策略影响大的难题。考虑输电线路故障时自身充放电暂态过程，线路区内外故障时，线路两端电压和电流在时域特征和分频段特征的交叉关联与区间映射存在显著区别，为新型电力系统输电线路继电保护新原理研究、测试等相关工作提供了基础支撑。

参考文献：

[1] 郑玉平，吕鹏飞，李斌，等. 新型电力系统继电保护面临的问题与解决思路[J]. 电力系统自动化，2023，47(22): 3-15.
ZHENG Yuping, LYU Pengfei, LI Bin, et al. Problems faced by relay protection in new power system and their solution ideas[J]. Automation of Electric Power Systems, 2023, 47(22): 3-15.

[2] ZHOU S C, LI Y F, JIANG C W, et al. Enhancing the resilience of the power system to accommodate the construction of the new power system: key technologies and challenges[J]. Frontiers in Energy Research, 2023, 11: 1256850.

[3] 贾科，姚昆鹏，刘子奕，等. 基于故障行波差异性的柔性直流输电线路纵联保护[J]. 中国电机工程学报，2024，44(7): 2616-2628.
JIA Ke, YAO Kunpeng, LIU Ziyi, et al. Pilot protection for flexible HVDC transmission lines based on the difference of fault traveling waves[J]. Proceedings of the CSEE, 2024, 44(7): 2616-2628.

[4] 郭琦，卢远宏. 新型电力系统的建模仿真关键技术及展望[J]. 电力系统自动化，2022，46(10): 18-32.
GUO Qi, LU Yuanhong. Key technologies and prospects of modeling and simulation of new power system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2022, 46(10): 18-32.

[5] 黎博，陈民铀，钟海旺，等. 高比例可再生能源新型电力系统长期规划综述[J]. 中国电机工程学报，2023，43(2): 555-581.
LI Bo, CHEN Minyou, ZHONG Haiwang, et al. A review of long-term planning of new power systems with large share of renewable energy[J]. Proceedings of the CSEE, 2023, 43(2): 555-581.

[6] 贾科，杨哲，赵其娟，等. 适用于新能源场站送出线路的高频突变量距离保护[J]. 电网技术，2019，43(9): 3271-3280.
JIA Ke, YANG Zhe, ZHAO Qijuan, et al. High-frequency fault component based distance protection for transmission lines connected to renewable energy power plants[J]. Power System Technology, 2019, 43(9): 3271-3280.

[7] 王伟杰，曾鑫洁，徐远途，等. 基于正序突变量相轨迹辨识的可再生能源配电网电流保护[J]. 发电技术，2024，45(4): 753-764.
WANG Weijie, ZENG Xinjie, XU Yuantu, et al. Renewable energy distribution network overcurrent protection based on positive-sequence sudden-change component locus identification[J]. Power Generation Technology, 2024, 45(4): 753-764.

[8] 刘建勋，李凤婷，解超，等. 工频变化量距离保护在交直流混联系统中的动作特性分析及改进措施[J]. 电力科学与技术学报，2023，38(1): 88-96.
LIU Jianxun, LI Fengting, XIE Chao, et al. Action characteristic analysis and improvement measures of the distance protection using power frequency variable components in AC/DC hybrid system[J]. Journal of

Electric Power Science and Technology, 2023, 38(1): 88-96.

[9] 孔祥平.含分布式电源的电网故障分析方法与保护原理研究[D].武汉:华中科技大学,2014.
KONG Xiangping. Study on fault analysis method and relay protection of power grid with distributed generators [D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology,2014.

[10] 肖繁.适用于新能源规模化接入的电网继电保护关键问题研究[D].武汉:华中科技大学,2016.
XIAO Fan. Study on key problems of relay protection in the power grid with large-scale renewable energy sources [D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology,2016.

[11] 桂小智,宋国兵,常鹏,等.适用于新能源并网系统的距离保护方法[J].电力工程技术,2023,42(3): 250-257.
GUI Xiaozhi, SONG Guobing, CHANG Peng, et al. Distance protection method applicable to renewable energy grid-connected systems[J]. Electric Power Engineering Technology,2023,42(3): 250-257.

[12] 李君,何敏,黄守道,等.基于相位差的小电阻接地有源配电网接地故障保护算法[J].电工技术学报,2024,39(23): 7418-7429.
LI Jun,HE Min,HUANG Shoudao,et al.Grounding fault protection algorithm of small resistance earthing active distribution network based on phase difference[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2024, 39 (23): 7418-7429.

[13] 戴志辉,张艺宏,于礼瑞,等.适用于新型配电网的改进型电流保护[J].华北电力大学学报(自然科学版),2024,51(1): 1-9+19+10.
DAI Zhihui, ZHANG Yihong, YU Lirui, et al. Improved current protection suitable for new distribution network [J]. Journal of North China Electric Power University (Natural Science Edition),2024,51(1): 1-9+19+10.

[14] 罗国敏,赵祎薇,吴梦宇,等.适应高比例新能源接入的配电网改进型自适应电流保护方法[J].供用电,2024,41(9): 12-23.
LUO Guomin,ZHAO Yiwei,WU Mengyu,et al.Improved adaptive current protection method suitable for distribution network adapted to high proportion of new energy source accessed[J]. Distribution & Utilization, 2024,41(9): 12-23.

[15] 张政伟,陈谦,牛应灏,等.基于实时生成定值的高比例新能源电网自适应电流保护[J].电力建设,2024,45(2): 137-146.
ZHANG Zhengwei,CHEN Qian,NIU Yinghao,et al.Real-time generated protection settings based adaptive current protection for transmission line considering high proportion of new energy source[J]. Electric Power Construction,2024,45(2): 137-146.

[16] 和敬涵,王语然,李猛,等.基于电流波形畸变特征的高比例光伏配电网故障方向判别原理[J].电网技术,2023,47(12): 4856-4867.
HE Jinghan, WANG Yuran, LI Meng, et al. New fault direction identification based on current distortion characteristics in high proportion PV distribution system [J].Power System Technology,2023,47(12): 4856-4867.

[17] 李振兴,朱益,王扬赜,等.小级差需求下基于故障首半波比较的快速电流保护[J].电力自动化设备,2024,44(6): 153-160+201.
LI Zhenxing, ZHU Yi, WANG Yangze, et al. Fast current protection based on fault first half-wave comparison under small stage difference demand[J]. Electric Power Automation Equipment,2024,44(6): 153-160+201.

[18] 李怀强,张健康,蒋嘉桁,等.西北电网 330 kV 尖樊线人工短路试验中接地距离保护适应性分析[J].电力自动化设备,2024,44(3): 67-74+90.
LI Huaiqiang, ZHANG Jiankang, JIANG Jiaheng, et al. Adaptability analysis of grounding distance protection of 330 kV Jian-Fan transmission line artificial short circuit test in Northwest Branch of State Grid[J].Electric Power Automation Equipment,2024,44(3): 67-74+90.

[19] 王华昕,刘健,邹龙,等.新型电力系统下低压直流配网的接地故障保护方法[J].电测与仪表,2024,61(10): 144-152.
WANG Huaxin, LIU Jian, ZOU Long, et al. Grounding fault protection method for low-voltage DC distribution network under novel power system[J]. Electrical Measurement & Instrumentation,2024,61(10): 144-152.

[20] 高靖怡,翁汉琍,林湘宁,等.全功率型逆变电源侧工频变化量距离保护性能下降机理分析[J].电力自动化设备,2024,44(10): 157-164.
GAO Jingyi, WENG Hanli, LIN Xiangning, et al. Performance degradation mechanism analysis of power frequency variation distance protection on full power inverter power supply side[J].Electric Power Automation Equipment,2024,44(10): 157-164.

[21] 曾翔,文明浩,钱堃,等.逆变型分布式电源接入对接地距离保护的影响与对策[J].智慧电力,2023,51(1): 46-53.
ZENG Xiang,WEN Minghao,QIAN Kun,et al.Influence of inverter-interfaced distributed generation integration on grounding distance protection and its strategies[J]. Smart Power,2023,51(1): 46-53.

[22] 叶远波,王吉文,汪胜和,等.计及故障点两侧零序电流相位差的新能源送出线路接地故障时域距离保护研究[J].电力系统保护与控制,2023,51(20): 180-187.
YE Yuanbo, WANG Jiwen, WANG Shenghe, et al. Time domain distance protection of new energy transmission

line grounding fault considering the phase difference of zero sequence current on both sides of the fault point[J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(20): 180-187.

[23] 晁晨栩,郑晓冬,叶海,等.针对海上风电场汇集线路单相接地故障的柔直侧新型距离保护方案[J].中国电机工程学报,2024,44(15): 5899-5908.
CHAO Chenxu,ZHENG Xiaodong,YE Hai,et al.A novel MMC-side distance protection scheme for single-phase grounding fault of offshore wind farm collection line[J]. Proceedings of the CSEE,2024,44(15): 5899-5908.

[24] 洪丰,吴通华,郑玉平,等.柔性直流送出系统交流线路的自适应距离保护方法[J].电力系统自动化,2023,47(22): 25-32.
HONG Feng, WU Tonghua, ZHENG Yuping, et al. Adaptive distance protection method for AC lines connected with flexible DC transmission system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2023, 47(22): 25-32.

[25] 黎钊,吴宇奇,郑宇超,等.基于控保结合的适配孤岛场景单相接地故障的新型距离保护方案[J].中国电机工程学报,2023,43(24): 9509-9523.
LI Zhao, WU Yuqi, ZHENG Yuchao, et al. A novel distance protection scheme for island grid based on control combined with protection under single-phase ground fault[J]. Proceedings of the CSEE, 2023, 43(24): 9509-9523.

[26] 张太升,韩伟,杨霖,等.基于波形相关分析的双馈风电场送出线时域距离保护[J].电力系统保护与控制,2021,49(14): 82-88.
ZHANG Taisheng, HAN Wei, YANG Lin, et al. Time-domain distance protection for transmission lines of doubly-fed wind farms based on waveform correlation analysis[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(14): 82-88.

[27] 樊艳芳,侯俊杰,晁勤,等.一种抗暂态超越的集群风电送出线时域方程模型误差修正距离保护[J].电力自动化设备,2018,38(1): 10-18.
FAN Yanfang, HOU Junjie, CHAO Qin, et al. Time-domain equation model deviation correction distance protection for cluster wind power transmission line with anti-transient ability[J]. Electric Power Automation Equipment,2018,38(1): 10-18.

[28] 戴志辉,柳梅元,韦舒清,等.基于超导磁储能的光伏场站送出线路距离保护[J].中国电力,2024,57(10): 102-114.
DAI Zhihui, LIU Meiyuan, WEI Shuqing, et al. Distance protection for outgoing line of photovoltaic station based on superconducting magnetic energy storage[J]. Electric Power,2024,57(10): 102-114.

[29] HU Z P,LI B,ZHENG Y P,et al.Fast distance protection scheme for wind farm transmission lines considering R-L and bergeron models[J]. Journal of Modern Power Systems and Clean Energy,2023,11(3): 840-852.

[30] 聂铭,李猛,和敬涵,等.基于状态估计的大规模新能源送出线路纵联保护[J].电网技术,2024,48(5): 2189-2198.
NIE Ming,LI Meng,HE Jinghan,et al.Pilot protection of large-scale renewable energy transmission lines based on state estimation[J]. Power System Technology, 2024, 48(5): 2189-2198.

[31] 马静,耿若楠,郝川钧.基于频域模型匹配的双馈风电场送出线路纵联保护方案[J].中国电机工程学报,2024,44(21): 8364-8378.
MA Jing, GENG Ruonan, HAO Chuanjun. Longitudinal protection scheme of doubly-fed wind farm transmission lines based on frequency domain model matching[J]. Proceedings of the CSEE,2024,44(21): 8364-8378.

[32] 余越,王聪博,樊沛林,等.基于差动电流能量比的新能源场站送出线路纵联保护[J].电网技术,2024,48(2): 851-859.
YU Yue, WANG Congbo, FAN Peilin, et al. Pilot protection based on energy ratio of differential current for outgoing line from renewable power plants[J].Power System Technology,2024,48(2): 851-859.

[33] 郑黎明,贾科,毕天姝,等.基于余弦相似度的新能源场站T接型送出线路纵联保护[J].电力系统自动化,2019,43(18): 111-119.
ZHENG Liming, JIA Ke, BI Tianshu, et al. Cosine similarity based pilot protection of teed transmission line connected to renewable energy power plants[J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(18): 111-119.

[34] 刘乃皓,高厚磊,徐彬,等.基于电流变化量相似性的海上风电场交流送出线路纵联保护[J].电力系统保护与控制,2023,51(9): 65-75.
LIU Naihao, GAO Houlei, XU Bin, et al. Pilot protection for an AC transmission line of an offshore wind farm based on similarity of current variation[J].Power System Protection and Control,2023,51(9): 65-75.

[35] 刘乃皓,高厚磊,徐彬,等.基于电流变化量相似性的海上风电场交流送出线路纵联保护[J].电力系统保护与控制,2023,51(9): 65-75.
LIU Naihao, GAO Houlei, XU Bin, et al. Pilot protection for an AC transmission line of an offshore wind farm based on similarity of current variation[J].Power System Protection and Control,2023,51(9): 65-75.

[36] 徐艳春,范钟耀,孙思涵,等.基于边缘检测的大规模风电场送出线路纵联保护算法[J].电力自动化设备,2023,43(1): 90-99.

XU Yanchun, FAN Zhongyao, SUN Sihan, et al. Pilot protection algorithm of large-scale wind farm outgoing transmission line based on edge detection[J]. Electric Power Automation Equipment,2023,43(1): 90-99.

[37] 牛伟民,樊艳芳,侯俊杰,等.基于正序阻抗幅值比的风电场送出线路纵联保护[J].电力系统保护与控制,2023,51(16): 179-187.
NIU Weimin, FAN Yanfang, HOU Junjie, et al. Pilot protection of wind farm transmission lines based on the positive sequence impedance amplitude ratio[J]. Power System Protection and Control,2023,51(16): 179-187.

[38] 桂小智,蒙天赐,潘本仁,等.基于综合阻抗的光伏发电并网联络线纵联保护[J].电网与清洁能源,2023,39(8): 139-144+154.
GUI Xiaozhi,MENG Tianci,PAN Benren,et al.The pilot protection of grid connection lines for photovoltaic power generation based on integrated impedance[J]. Power System and Clean Energy, 2023, 39(8): 139-144+154.

[39] 贾科,孔繁哲,张旸,等.基于改进K-均值算法的双馈风场故障等值建模方法[J].电网技术,2023,47(10): 4161-4173.
JIA Ke, KONG Fanzhe, ZHANG Yang, et al. Fault equivalent modeling of doubly fed wind farm based on improved K-means algorithm[J]. Power System Technology,2023,47(10): 4161-4173.

[40] 匡晓云,方煜,关红兵,等.适用于含新能源逆变电源网络的全时域短路电流计算方法[J].电力自动化设备,2020,40(5): 113-122.
KUANG Xiaoyun,FANG Yu,GUAN Hongbing,et al.Full-time domain short circuit current calculation method suitable for power network with inverter-interfaced renewable energy source[J]. Electric Power Automation Equipment,2020,40(5): 113-122.

[41] FAN Z C, LI D, RAHARDJA S. Pure number discrete fractional complex hadamard transform[J]. IEEE Signal Processing Letters,2023,30: 1087-1091.

[42] YANG Z J,HUA H C,CAO J W.Multiple impact factor based accuracy analysis for power quality disturbance detection[J]. CSEE Journal of Power and Energy Systems,2023,9(1): 88-99.

[43] FANG J S,CHEN K J,LIU C R,et al.An explainable and robust method for fault classification and location on transmission lines[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics,2023,19(10): 10182-10191.

[44] 吴林林,李蕴红,于思奇,等.基于短路比指标的风电汇集系统稳定性分析[J].电力自动化设备,2022,42(8): 72-78.
WU Linlin,LI Yunhong,YU Siqi,et al.Stability analysis of dense wind power area based on short circuit ratio index[J].Electric Power Automation Equipment,2022,42(8): 72-78.