

DOI:10.20033/j.1003-7241.(2026)03-0041-06

基于TET的UPFC输电线路故障检测分类

李 骑, 王 鸿, 王 佩, 杨 杰

(国网新疆电力有限公司超高压分公司, 新疆 乌鲁木齐 830002)

摘要:为应对统一电力流控制器对传统距离保护的影响,提出了一种新的基于瞬态提取变换输电线路故障检测与分类方案。运用瞬态提取变换算子进行快速故障检测,利用模态电流TET算子的样本间差分快速检测故障发生,然后利用故障后一周波的三相电流及接地电流的TET特征进行分类识别,旨在提高检测速度、提高分类精度、增强抗噪声能力,为UPFC输电线路提供更可靠的保护,继而通过BP神经网络、支持向量机、决策树和随机森林等分类器进行故障分类。仿真结果表明,TET特征使BP神经网络、支持向量机、决策树和随机森林分类器的平均分类准确率分别达到99.71%、99.82%、99.89%和99.93%,检测时间均在5ms以内,相较于传统方法,展现了高度的准确性、更佳动态性能和分类准确性,同时不受过补偿操作、故障类型和位置的限制。该方案在OPAL-RT实时仿真平台上的验证也证实了其有效性,可快速准确地检测和分类UPFC补偿线路的各种故障。

关键词:UPFC;输电线路保护;故障检测;故障分类;TET

中图分类号:TM73;TP183

文献标志码:A

文章编号:1003-7241(2026)03-0041-06

Classification of UPFC transmission line fault detection based on TET

LI Qi, WANG Hong, WANG Pei, YANG Jie

(Ultra High Voltage Branch of State Grid Xinjiang Electric Power Co., Ltd., Urumqi 830002, Xinjiang, China)

Abstract: A new transmission line fault detection and classification scheme is proposed to cope with the impact of Unified Power Flow Controller on traditional distance protection. The scheme employs the transient extraction transform(TET) operator for fast fault detection, followed by fault classification by classifiers such as BP neural networks, support vector machines, decision trees and random forests. This solution employs the transient extraction transform operator for rapid fault detection. It utilizes the inter-sample difference of the modal current TET operator to quickly detect fault occurrences, followed by classification and identification using TET features of the three-phase currents and grounding current within one post-fault cycle. The aim is to enhance detection speed, improve classification accuracy, strengthen noise resistance, and provide more reliable protection for UPFC transmission lines. Simulation results show that the TET features enable the BP neural network, support vector machine, decision tree and random forest classifiers to achieve average classification accuracies of 99.71%, 99.82%, 99.89% and 99.93%, respectively, and the detection times are all within 5 ms. Compared to traditional methods, it demonstrates high accuracy, superior dynamic performance, and enhanced classification accuracy, while being unaffected by overcompensation operations, fault types, or fault locations. The validation of this scheme on the OPAL-RT real-time simulation platform also confirms its effectiveness in quickly and accurately detecting and classifying various faults in UPFC compensation lines.

Keywords: UPFC; transmission line protection; fault detection; fault classification; TET

随着电力需求的快速增长,提高现有输电线路的输电能力变得越发重要^[1]。灵活交流输电系统(flexible AC transmission system,FACTS)作为一种新型输电补偿技术,其中的统一电力流控制器^[2](unified power flow controller,UPFC)可以独立调节线路的有功功率和无功功率,在提高输电能力方面具有重要作用。然而,UPFC的运行模式对传统距离保护产生了影响,如何实现UPFC输电线路的可靠保护成为一个新的研究课题。

目前,国内外学者针对这一问题开展了大量研究。文献[3]基于输电线路阻感模型提出一种以UPFC为线路边

界的输电线路保护方法,文献[4]针对UPFC输电线路提出了基于数据挖掘的保护方案,文献[5]利用了超瞬态分量进行故障检测,文献[6]提出了基于决策树的故障分类方法,文献[7]则采用了支持向量机对故障进行识别。上述方法在一定程度上解决了UPFC环境下的保护问题,但仍存在检测时间长、对抗噪声能力差、分类精度不够等不足。

为此,本文提出一种基于瞬态提取变换^[8](transient extracting transform,TET)的新型故障检测与分类方法。该方法利用模态电流TET算子的样本间差分快速检测故障发生,然后利用故障后一周波的三相电流及接地电流的TET

收稿日期:2024-07-19;录用日期:2024-08-28

基金项目:国家自然科学基金项目(61364010)

作者简介:李 骑(1986—),男,本科,高级工程师,研究方向:直流设备运维、检修。

引用本文:李骑,王鸿,王佩,等.基于TET的UPFC输电线路故障检测分类[J].自动化技术与应用,2026,45(3):41-45,83.(LI Qi, WANG Hong, WANG Pei, et al. Classification of UPFC transmission line fault detection based on TET[J]. Techniques of Automation and Applications, 2026,45(3):41-45,83.)

特征进行分类识别,旨在提高检测速度、提高分类精度、增强抗噪声能力,为 UPFC 输电线路提供更可靠的保护。

本文研究受益于国家自然科学基金项目(61364010)“风力发电系统计网过渡驻留统络故障诊断方法研究”的资助,旨在提出一种快速准确的 UPFC 输电线路故障检测与分类新方法。该项目关注风电系统、电网故障诊断与过渡分析等问题,本文工作与项目中“电网故障诊断”的研究内容高度契合。

1 UPFC 对传统距离保护的影响

本研究通过利用一个典型的两母线网络系统(图 1)来考察距离保护的性能。在这里,UPFC 安装在 S 母线上。UPFC 包含两种电压源转换器:静态同步串联补偿器(static synchronous series capacitor, SSSC)和静态同步补偿器(static synchronous compensator, STATCOM)的电压源转换器(voltage source converters, VSCs),并通过电容器(C)相连。VSCs 通过变压器 T1 和 T2 连接到输电线(transmission line, TL)。整个系统使用 MATLAB/Simulink^[9] 软件进行仿真。

UPFC 的额定参数为 220 kV, 100 MVA, 采用双 48 脉冲的 VSCs 和一个 2 500 μF 的电容器。UPFC 以 4 种不同的模式运行。

1) 功率流模式(PFM)

$$P_{ref}, Q_{ref} = 8.7, -0.6 \text{ p.u. 至 } 8.7, +0.6 \text{ p.u.}$$

2) 电压注入模式(VIM)

$$V_{inj} = 5, 10\%$$

3) 电压控制模式(VCM)

$$V_{ref} = 0.95, 1.05 \text{ p.u.}$$

4) 无功控制模式(VARCM)

$$Q_{ref} = -0.8, +0.8 \text{ p.u.}$$

在 VCM 中,当 $V_{ref} = 1 \text{ p.u.}$ 时,电压下降 0.05 p.u., 因此 $V_{ref} = 1.05 \text{ p.u.}$ 和 $V_{ref} = 0.95 \text{ p.u.}$ 分别被视为感性和容性模式。在 VARCM 中,STATCOM 吸收无功功率 $Q_{ref} = +0.8 \text{ p.u.}$, 并为 $Q_{ref} = -0.8 \text{ p.u.}$ 注入无功功率。在 VIM 中, V_{inj} 越高, SSSC 的运行越趋于容性。在 PFM 中, STATCOM 和 SSSC 各自以其操作模式运行。

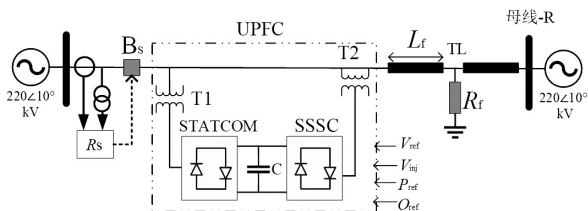
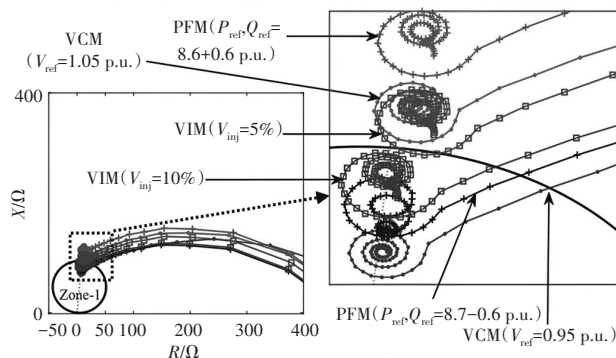


图 1 UPFC-ITL 的单线图(正向和零向阻抗分别为 0.0327+j0.326 Ω/km 和 0.328+j1.114 Ω/km)

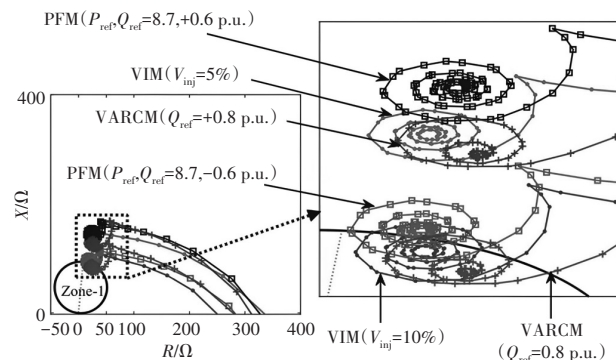
Fig. 1 Single line diagram of UPFC-ITL (forward and zero impedance 0.0327+j0.326 Ω/km and 0.328+j1.114 Ω/km respectively)

考虑 UPFC 所有运行模式,在 TL 上模拟了不同的故障情况。例如,模拟了 24 km 处 ($L_f = 70\%$) 的三相故障和

在 288 km 处 ($L_f = 90\%$) 的 ag 故障。结果如图 2 所示,根据 UPFC 的不同工作模式,故障位置不同,继电器的反应也会不同。在一些情况下,由于 UPFC 的操作特性,导致继电器未能正确响应故障。



(a) 距离为 70% 的三相故障



(b) 距离为 90% 的 ag 故障期间的阻抗特性

图 2 RS 在距离为 70% 的三相故障和距离为 90% 的 ag 故障期间的阻抗特性

Fig. 2 Impedance characteristics of RS during three-phase fault at 70% distance and ag fault at 90% distance

2 算法

本文提出的算法先通过模态分量的瞬态提取算子和样本差分法检测电力系统故障。再使用故障后电流的 TET 算子作为特征,应用于机器学习分类器如反向传播神经网络^[10-12](back propagation neural network, BPNN)、支持向量机^[13](support vector machine, SVM)、决策树^[14](decision tree, DT)和随机森林^[15](random forest, RF)以进行精准的故障分类。

2.1 瞬态提取变换

瞬态提取变换是短时傅里叶变换^[16](short-time Fourier transform, STFT)的改良版本,具有更好的局部时间定位特性。对于非平稳信号 $i(t)$, STFT 的表达式为

$$G(t, \omega) = \int_{-\infty}^{\infty} i(u)g(u-t)e^{-j\omega u} du \quad (1)$$

式中, $g(u-t)$ 是移动基函数。信号 $i(t)$ 表示为幅度为 A 的时间值 delta 函数 $\delta_d(t)$ 在 $t = t_0$ 处的局部化,即

$$i(t) = A\delta_d(t - t_0) \quad (2)$$

将式(2)代入式(1)得

$$G(t, \omega) = Ag(t_0 - t)e^{-j\omega t_0} \quad (3)$$

$\delta_d(t)$ 的 STFT 由一系列具有相同群延迟 t_0 的 delta 函数组成。 $G(t, \omega)$ 关于 ω 的导数表示为

$$\frac{\partial}{\partial \omega} G(t, \omega) = -it_0 G(t, \omega) \quad (4)$$

因此 $t_0(t, \omega)$ 表示为

$$t_0(t, \omega) = j \frac{\partial G(t, \omega)}{G(t, \omega)} \quad (5)$$

最后计算 TET 算子 τ 的计算公式为

$$\tau = |G(t, \omega) \delta_d(t - t_0(t, \omega))| \quad (6)$$

2.2 故障检测和分类

研究计算得到的 TET 算子 τ 被用作故障检测和分类的重要指标。首先,从母线 S 的三相电流计算出第 n 时刻的模态电流为

$$i_{\text{modal}}(n) = i_a(n) - 2i_b(n) + 2i_c(n) \quad (7)$$

在各类故障期间,模态电流 i_{modal} 都会出现显著的幅度变化,因此可用于故障检测。首先,利用 TET 方法计算出 i_{modal} 的 TET 算子 τ 。再进行样本对样本的差分计算,如下式所示

$$\Delta\tau(n) = \tau(n) - \tau(n - 1) \quad (8)$$

理论上,正常运行条件下 $\Delta\tau$ 应接近零,并在故障发生时出现显著的增加。为了避免误报,设置了适当的阈值 $\tau_{\text{th}} = 0.001$ 。若 $\Delta\tau > \tau_{\text{th}}$, 则判定为故障(FDO=1)。

以图 3(a) 所示的故障电流信号 $i(t)$ 为例,使用式 (7) 和式 (9) 计算出的 τ 和 $\Delta\tau$ 分别如图 3(b) 和 3(c) 所示。该方法的时频表示如图 3(d) 所示。

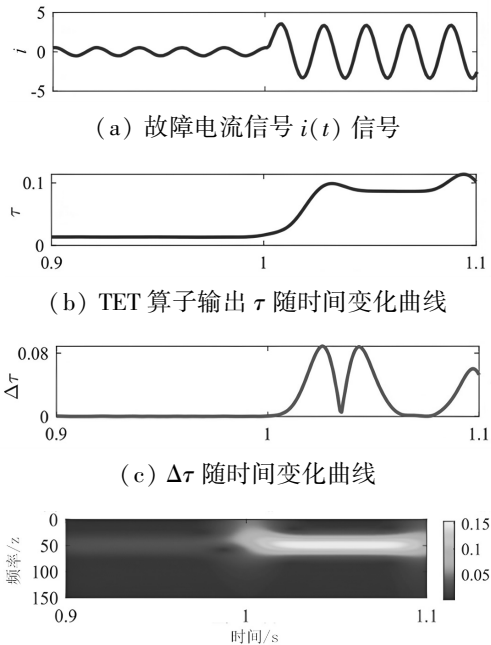


图 3 信号 $i(t)$ 的 TET 算子

Fig. 3 TET operator for signal $i(t)$

一旦检测到故障,即开始故障分类任务。分别计算三相和接地电流的 TET 算子 τ_a, τ_b, τ_c 和 τ_g 。然后,计算故障发生一个周期后的 τ 数据($S_{\tau_a}, S_{\tau_b}, S_{\tau_c}, S_{\tau_g}$) 为

$$S_{\tau_a}(n) = \sum_{n-M}^n \tau_a(n) \quad (9)$$

$$S_{\tau_b}(n) = \sum_{n-M}^n \tau_b(n) \quad (10)$$

$$S_{\tau_c}(n) = \sum_{n-M}^n \tau_c(n) \quad (11)$$

$$S_{\tau_g}(n) = \sum_{n-M}^n \tau_g(n) \quad (12)$$

这些不同相位和接地的 S_{τ} 数据,通过式 (10) 计算得出,被应用于 RBNN、SVM、DT、RF 分类器中,用于进一步的故障分类任务。步骤流程如图 4 所示。

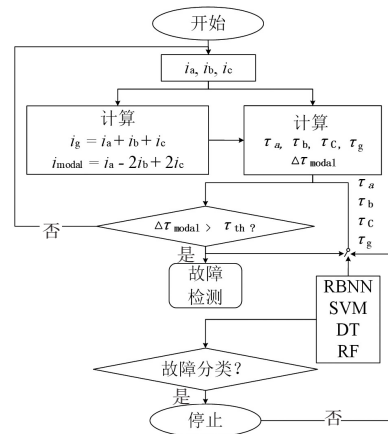


图 4 算法流程图

Fig. 4 Algorithm flowchart

3 结果

在提出的算法中,首先通过检测模态分量 TET 算子的样本差异来识别故障。再利用故障后一个周期的三相电流和接地电流的 TET 算子作为特征,应用于多种分类器进行故障分类。为了验证算法的有效性,模拟了多种故障和非故障情况,包括改变故障类型、故障电阻 ($R_f = 1, 10, 30, 100 \Omega$)、故障位置 ($L_f = 64, 128, 320, 160, 192, 256, 320 \text{ km}$)、故障起始角 ($FIA = 0^\circ, 5^\circ, 90^\circ, 144^\circ, 180^\circ$) 和 UPFC 的运行模式 (VCM、VARCM、VIM、PFM)。采样率设置为 1 kHz,以评估算法的性能。

3.1 故障检测结果

1) 平衡故障的性能

在 1 s 时,距离 R_s 为 288 km 处产生一个三相故障,运行模式为 VCM ($V_{inj} = 5\%$)。图 5 显示,在故障发生后, $\Delta\tau_{\text{modal}}$ 大于预设阈值 τ_{th} , 因此 FDO=1 表明在 2 ms 内成功检测到故障,从而可以进行故障分类,并计算不同相位和接地的 TET 算子。

2) 不平衡故障的性能

在 1.002 s 时,距离 R_s 为 256 km, $R_f = 10 \Omega$, 运行模式为 VARCM ($Q_{\text{ref}} = +0.8 \text{ p.u.}$) 发生了一个 cg 故障。图 6 显示,在故障发生后, $\Delta\tau_{\text{modal}}$ 同样大于 τ_{th} , 因此 FDO=1 表明在 3 ms 内检测到故障。与平衡故障类似,这也使得可以进行故障分类,并计算不同相位和接地的 TET 算子。表 1 提供了更多故障案例及其故障起始时间 ($t_{\text{inception}}$) 和故

障检测时间($t_{\text{detection}}$)。

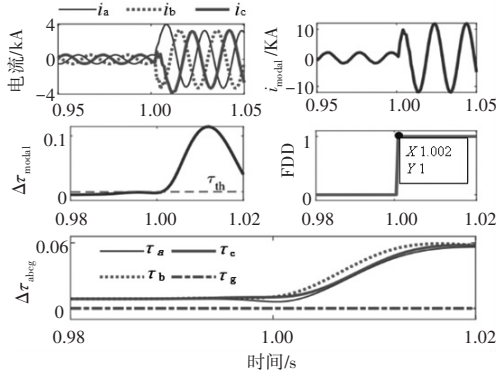


图5 abc故障期间的性能

Fig. 5 Performance during abc failure

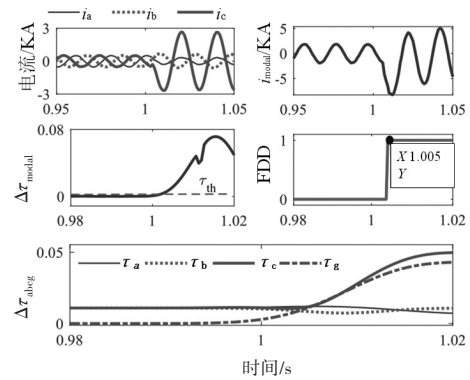


图6 c故障期间的性能

Fig. 6 Performance during c-failure

表1 更多故障案例结果

Tab. 1 More failure case results

故障类型	$t_{\text{inception}}/s$	$t_{\text{detection}}/ms$
ag-fault, $L_f = 224 \text{ km}$, $R_f = 10 \Omega$, $FIA = 90^\circ$, $VIM (V_{\text{inj}} = 10\%)$	1.000	3
bg-fault, $L_f = 256 \text{ km}$, $R_f = 30 \Omega$, $FIA = 144^\circ$, $VCM (V_{\text{ref}} = 0.95 \text{ p. u.})$	1.003	2
cg-fault t, $L_f = 160 \text{ km}$, $R_f = 100 \Omega$, $FIA = 0^\circ$, $PFM (P_{\text{ref}}, Q_{\text{ref}} = 8.7, +0.6 \text{ p. u.})$	0.995	4
ab-fault, $L_f = 288 \text{ km}$, $R_f = 1 \Omega$, $FIA = 90^\circ$, $VIM (V_{\text{inj}} = 5\%)$	1.000	2
bc-fault, $L_f = 224 \text{ km}$, $R_f = 1 \Omega$, $FIA = 36^\circ$, $PFM (P_{\text{ref}}, Q_{\text{ref}} = 8.7, -0.6 \text{ p. u.})$	0.998	1
ca-fault, $L_f = 256 \text{ km}$, $R_f = 1 \Omega$, $FIA = 144^\circ$, $VCM (V_{\text{ref}} = 1.05 \text{ p. u.})$	1.003	2
abg-fault, $L_f = 160 \text{ km}$, $R_f = 10 \Omega$, $FIA = 36^\circ$, $VIM (V_{\text{inj}} = 10\%)$	0.998	3
bcg-fault, $L_f = 256 \text{ km}$, $R_f = 30 \Omega$, $FIA = 144^\circ$, $VCM (V_{\text{ref}} = 1.05 \text{ p. u.})$	1.003	3
cag-fault, $L_f = 160 \text{ km}$, $R_f = 100 \Omega$, $FIA = 90^\circ$, $PFM (P_{\text{ref}}, Q_{\text{ref}} = 8.7, -0.6 \text{ p. u.})$	1.000	4
abc-fault, $L_f = 224 \text{ km}$, $R_f = 1 \Omega$, $FIA = 144^\circ$, $VIM (V_{\text{inj}} = 10\%)$	1.003	1

3.2 故障分类结果

通过改变故障类型、 L_f 、 R_f 、 FIA 和UPFC运行模式,共获得4500个不同的故障案例。这些案例均被准确地注册并分类,并通过使用来自母线S的三相电流和接地电流计算得出的 τ 数据。故障后一个周期的 S_τ 数据在BPNN、SVM、DT和

RF分类器中进行训练和测试,其中70%用于训练,30%用于验证。不同分类器使用TET特征的结果分别如图7~图10所示。整体混淆矩阵显示,提出的TET特征为BPNN、SVM、DT和RF分类器提供了极高的平均分类准确率(分别达到99.71%、99.82%、99.89%和99.93%)。

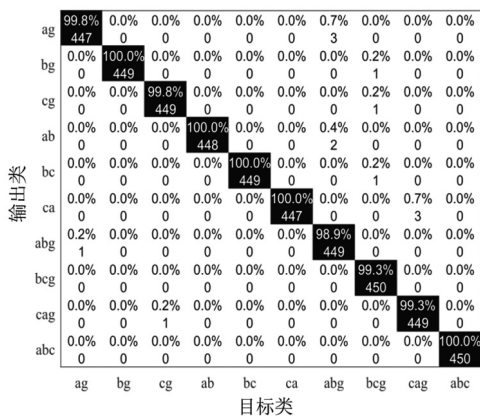


图7 BPNN分类器的整体混淆矩阵

Fig. 7 Overall confusion matrix for the BPNN classifier

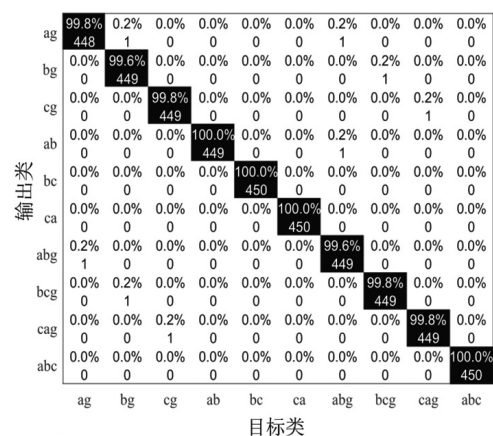


图8 SVM分类器的整体混淆矩阵

Fig. 8 Overall confusion matrix for SVM classifiers

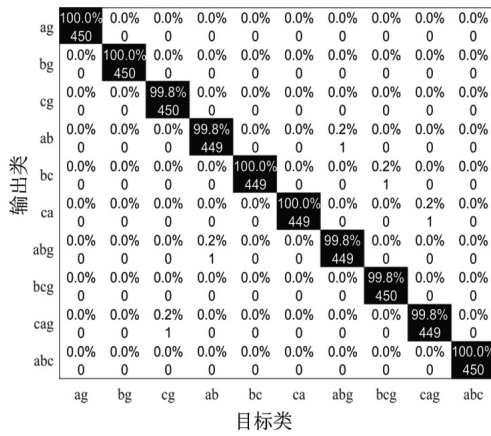


图9 DT分类器的整体混淆矩阵

Fig. 9 Overall confusion matrix for the DT classifier

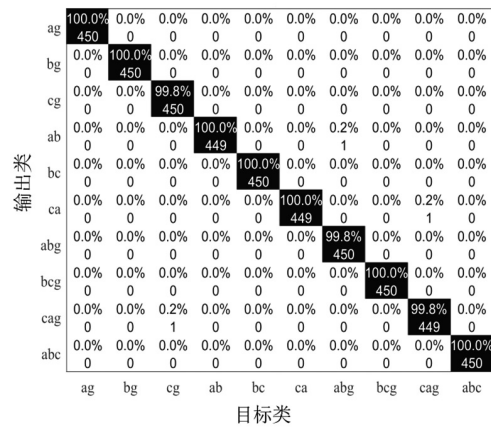


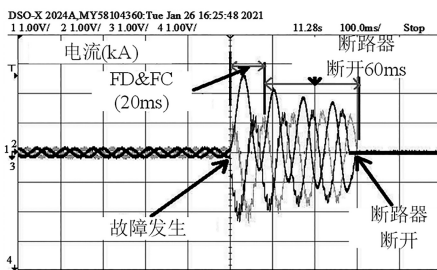
图10 RF分类器的整体混淆矩阵

Fig. 10 Overall confusion matrix for RF classifiers

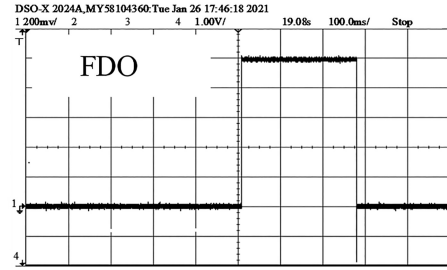
4 实时验证

为了验证提出算法的实用性和效果,模拟模型(如图1所示)在RT-LAB^[17]软件中实施,并在OPAL-RT^[18](OP4510)中进行了实时验证。

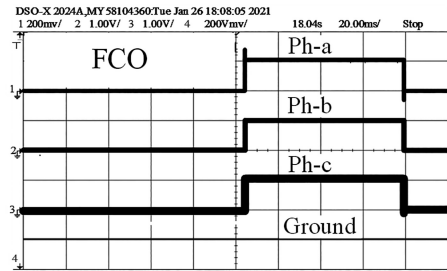
在实时验证过程中,特别关注了母线S处的电流信号,以平衡故障为例,如图11所示。结果表明,故障被准确地检测和分类,且处理时间在一个周期内完成。同时,图11进一步展示了在实时环境中对故障的正确检测和分类。



(a) 三相电流



(b) FDO



(c) FCO

图11 OP4510平台结果

Fig. 11 OP4510 platform results

5 结论

本文提出的基于TET的UPFC输电线路故障检测与分类新方法,在故障检测速度、分类准确率和适用性方面展现出显著优势。该方法实现了5ms内的快速故障检测,确保了线路的快速隔离需求;在不同分类器测试中,分类准确率超过99.7%,显示了高度的准确性;同时,该方法能够适应各类故障情况,不受过补偿操作、故障类型和位置的限制。通过仿真验证,证明了其在提供UPFC输电线路保护方面的可靠性,相较于传统方法,展现了更佳的动态性能和分类准确性。未来工作将考虑将该方案应用于实际电力系统,并探索更多分类方法以进一步提升性能。

参考文献

- [1]陈艳波,王德帅,田昊欣,等.基于源荷协调运行的电网可用输电能力优化方法[J].电力系统保护与控制,2025,52(23):119-134.
- [2]张友军,马超,胡传雷,等.一种新型混合直接潮流控制器[J].电机与控制学报,2025,29(3):166-176.
- [3]董政鑫,李斌,胡泽鹏,等.以UPFC为边界的新型线路距离保护方法[J].电力系统及其自动化学报,2023,35(9):10-19.
- [4]范栋琛,宋亮亮,崔玉,等.基于数据挖掘的含UPFC输电线路纵差保护方案[J].电子器件,2021,44(4):907-911.
- [5]BISWAS S, NAYAK P K. Superimposed component-based protection scheme for UPFC compensated transmission lines[C]//2018 20th IEEE National Power Systems Conference (NPSC). Tiruchirappalli, India:IEEE, 2018:1-6.
- [6]JENA M K, SAMANTARAY S R, TRIPATHY L. Decision tree-induced fuzzy rule-based differential relaying for transmissionline including unified power flow controller and wind-farms[J]. IET Generation, Transmission & Distribution, 2014, 8(12):2144-2152.
- [7]SAMANTARAY S. A data-mining model for protection of FACTS-based transmission line[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2013, 28(2):612-618.

(下转第83页)