

基于分层递进架构的实用型变压器保护故障定位方法

张晓宇 程 骁 顾乔根 莫品豪 郑 超

(南京南瑞继保电气有限公司, 南京 211102)

摘要 与母线、线路、断路器等其他一次设备相比, 变压器的结构更复杂, 而且跨不同电压等级, 加之变压器本身星角变换的影响, 使其区内外故障特征复杂多变, 故障点定位困难, 依赖技术人员经验, 缺少完整的自动化故障定位分析体系。鉴于此, 本文首先对可能引起变压器保护启动或动作的情况进行分层分类, 然后逐一设置故障定位判据, 从而大大提升了变压器故障定位的自动化程度, 具有较好的工程实施价值。最后, 通过多组仿真波形证明了本文所提方法的可行性和准确性。

关键词: 变压器保护; 故障定位; 分层递进架构

A practical transformer protection fault location method based on hierarchical progressive architecture

ZHANG Xiaoyu CHENG Xiao GU Qiaogen MO Pinhao ZHENG Chao

(NR Electric Co., Ltd, Nanjing 211102)

Abstract Compared to other primary equipments such as busbars, lines, and circuit breakers, transformers have a more complex structure and are the only equipment in the power system that connect different voltage levels. In addition, the influence of the Y/D transform makes the fault characteristics complex and variable, making it difficult to locate the fault point. The fault localization depends on the experience of the engineer. There is an urgent need for a complete automated fault location system. This article first classifies the possible situations that may cause transformer protection starting or tripping, and then sets fault localization criterion step by step. The criterion greatly enhances the automation level of transformer fault localization and has good engineering implementation value. The feasibility and accuracy of this method are proved through multiple sets of simulation waveforms.

Keywords: transformer protection; fault location; hierarchical progressive architecture

0 引言

随着我国输电系统规模不断扩大, 一次设备数量逐渐增多, 发生故障的概率也逐渐提高, 这对故障处理速度、故障定位的准确度提出了更高的要求。作为电力系统中的重要设备, 变压器结构复杂, 其故障定位较其他设备更加困难。文献[1-4]主要分析线路保护选相或小电流选线, 对变压器保护有一定参考价值, 但并不能直接应用于涉及多侧故障和星角变换的变压器保护。文献[5-11]从在线监测或离线

测试等角度出发, 研究了变压器的本体故障定位, 但使用的并非保护常用的电压和电流量。文献[12-14]重点研究了变压器差动保护的变换计算, 介绍了差动补偿方法及差异, 未涉及故障选相。文献[15-16]针对特定故障进行分析计算和经验总结, 并未形成基于数据化体系的故障定位算法。本文从工程实际情况出发, 通过对变压器保护启动或动作后的情况进行分层分类, 创新性地提出一种变压器故障定位架构和策略, 并经仿真分析来证明该策略的准确性。

1 变压器故障定位整体架构

1.1 故障定位难点

变压器的一次接线和主设备结构存在多种类型，故障类型多样，测点的种类和数量较多，相应的保护配置也较为复杂。变压器故障定位影响因素见表1。

表1 变压器故障定位影响因素

因素分类	类型列举
设备类型	两圈变压器、三圈变压器、自耦变压器、分相变压器
一次接线	单分支、多分支、3/2 接线，直接接地，间隙接地
系统特性	接地系统、不接地系统、电源、负荷
故障类型	区外故障、区内故障、金属性接地、金属性不接地、匝间、匝地、过励磁、失灵、无故障空充
保护类型	纵差差动，分侧差动，分相差动，小区差动，零序差动，过电流保护，零电流保护，阻抗保护，间隙保护，过励磁保护，失灵联跳，零序过电压保护

变压器故障分析有以下特点：

1) 由于变压器是跨电压等级设备，各侧可能为电源，也可能为负荷，很难通过某一侧的信息精准定位并判断故障类型。

2) 系统的接地点通常由变压器提供，接地故障的电气量特征由变压器自身接地情况和系统的接地运行方式共同决定。

3) 变压器通常存在星角变换，对于纵差保护，单相故障可能在多相同时引起差流，单纯依靠差流相别进行选相可能与实际不符。以两圈变压器为例，差流计算公式为

$$\begin{bmatrix} I_{dA} \\ I_{dB} \\ I_{dC} \end{bmatrix} = \mathbf{M}_1 \frac{[I_{A1} \ I_{B1} \ I_{C1}]^T}{I_{2bBr1}} + \mathbf{M}_2 \frac{[I_{A2} \ I_{B2} \ I_{C2}]^T}{I_{2bBr2}} \quad (1)$$

式中： I_{dA} 、 I_{dB} 、 I_{dC} 为三相差流； I_{A1} 、 I_{B1} 、 I_{C1} 为高压侧三相电流； I_{A2} 、 I_{B2} 、 I_{C2} 为低压侧三相电流； I_{2bBr1} 、 I_{2bBr2} 为高、低压侧的额定电流； \mathbf{M}_1 、 \mathbf{M}_2 为两侧转换矩阵。

对于 $\Delta \rightarrow Y$ 变换，有

$$\begin{cases} \mathbf{M}_1 = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \\ \mathbf{M}_2 = \frac{1}{\sqrt{3}} \begin{bmatrix} 1 & 0 & -1 \\ -1 & 1 & 0 \\ 0 & -1 & 1 \end{bmatrix} \end{cases} \quad (2)$$

对于 $Y \rightarrow \Delta$ 变换，有

$$\begin{cases} \mathbf{M}_1 = \frac{1}{\sqrt{3}} \begin{bmatrix} 1 & -1 & 0 \\ 0 & 1 & -1 \\ -1 & 0 & 1 \end{bmatrix} \\ \mathbf{M}_2 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \end{cases} \quad (3)$$

4) 变压器一次接线形式有多种，故障形式（不同侧别、不同相别、内部匝间故障等）多样，导致模拟量采集和保护配置种类均较其他保护复杂。

从上述分析可以看出，变压器故障类型的展示维度很多，需要对输入和输出分别进行归纳总结。同时，由于信息获取维度多，且判据需要尽量固化定值以适应多变的应用场景，因此需要对信息进行优先级整理，保证当部分信息获取不到，或者不同判据的预判结果有差异时，仍然可以得到唯一的定位结论。

1.2 输入信息分类

进行故障定位首先需要获取各类信息。信息大致可以分为两类，一类是必需信息，另一类是可选信息。

必需信息是故障分析的必要条件，这类信息缺失很可能导致故障定位无法进行，或者定位准确率大大降低。必需信息包括变压器容量、各侧电压等级、各侧CT电流比、变压器转角形式和系统一次接线、相关的模拟量数据。此外，还需相应的保护动作行为信息。当缺少保护动作行为信息时，可考虑结合保护算法和定值对动作行为进行模拟。

可选信息有助于在故障定位时排除不必要的干扰，简化相应步骤，提升定位的速度和准确性。可选信息包括变压器当前的接地方式和系统的接地方式、各侧电源和负荷的类型、保护装置的定值、其他保护动作情况、开关动作情况等。

1.3 输出结果分层展示

故障定位结果的输出展示存在不同维度的不同

组合,不仅要准确输出故障性质,还要与相应算法对应,在可行性和可读性之间取得最优平衡。基于此目标,把输出结果分为三个层次,分别是故障性质、故障侧别和故障相别。通过各级分层递进实现,先判别第一层,在其基础上判别下一层。

故障性质用于描述故障的大类,包括区内故障、区外故障(含负荷扰动)、空充及各类异常。有些特殊情况如低压单相接地,无法区分区内/外,则同时提示区内/区外。

故障侧别是定位故障发生在变压器哪一侧,如高压侧、中压侧、低压1侧、低压2侧等。如果受限于判据无法精准判断故障侧别,可在排除部分结果后给出多个侧别。对于第一层判断为空充的,给出空充的侧别;对于第一层判断为异常的,侧别结果为“空”。

相别判别即判别故障相,以及是否为接地故障。按 ABCN 结构展示,其中 ABC 表示故障相别, N 表示接地故障。对于第一层判断为空充和异常的,相别显示为“空”。

在上述判别过程中,还可根据特殊情况给出提示。如判断为区内故障后,当可进一步判别是引线故障还是变压器内部故障时,给出提示;对于异常,可给出异常种类(系统异常或回路异常等)。变压器故障定位过程如图1所示。

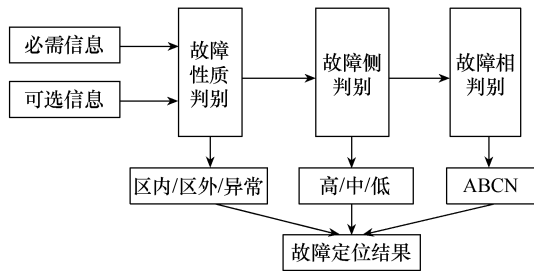


图1 变压器故障定位过程

2 故障性质判别

故障性质判别主要是根据收集到的信息判别是否为区内/外故障,在此之前要先区分所输入的信息是否会触发故障定位,如装置的一个电压互感器断线告警时,装置本身未故障,此时不宜触发故障定位逻辑。基于此,设定启动故障定位的触发条件为保护启动、保护动作、零序电压告警。若有以上三类信息,则取故障后的一段时间作为收集信息的时间窗,待信息收集完毕后进行判别;若无以上三类信息,则不进行故障定位判别。

保护的動作类型较多,包括主保护动作、后备保护动作、非电量动作、过励磁动作、CT断线导致的动作;保护的启动可能有空充启动和区外故障启动等,因此需要进行细化区分。本文采用顺序判别的执行方式,即当任一条满足后即停止判别,否则继续。这种方式既方便程序编写,又可做到不重不漏。制定顺序的原则为特征越清晰,越优先处理,比如非电量动作,基本可以确定为本体区内故障。故障性质判别优先级见表2。

表2 故障性质判别优先级

优先级	输入信息	判别结果
1	非电量动作	故障性质为区内故障,提示信息为本体区内
2	过励磁动作	故障性质为异常,提示信息为一次系统过电压或低频
3	CT断线报警	故障性质为异常,提示信息为××侧二次回路CT异常
4	差动等主保护动作	故障性质为区内故障
5	单侧从无流到有流	故障性质为空充
6	保护启动或后备保护动作	故障性质为区外故障
7	零序电压告警	故障性质为区内/区外。不接地系统的单相接地故障,保护很难区分接地点在区内还是区外

3 故障侧判别

变压器是跨间隔设备,其故障定位还需要识别故障发生的电压等级,即故障侧判别。单纯判别故障侧存在一定困难,本文主要依据第一层的故障性质判别结果,分类给出不同故障性质下的故障侧判别方法。

3.1 空充侧判别

当故障性质为空充时,直接选择有流侧作为故障定位的故障侧别。

3.2 区内/区外故障侧判别

根据第2节的分析,此类情况为低压侧零压告警,通常故障侧存在较大的零序电压,可以将零压告警侧作为故障侧别。

3.3 区外故障侧判别

故障性质定位为区外故障的,大致可分为两类:一类是其他保护动作的情况,包括其他保护切除故障、其他保护动作但未能完全切除故障(开关失灵等情况);另一类是其他保护未动作的情况,主要包

括负荷波动、其他保护特殊原因拒动、故障区域无主保护（如变低母线故障）导致的情况。

对于其他保护动作的情况，若定位系统可以获取其他保护的動作信息，则可方便地定位故障侧别和相别；若无法获取相关信息，则需通过自身信息进行判别，判别顺序仍然遵循特征越清晰越优先的原则，先判特殊动作元件，再判出口元件，接着判零序电流，最后根据自身电压电流量进行方向判别。

1) 特殊动作元件判别

若动作元件为零序过电压、间隙过电流、失灵联跳，则直接取对应动作元件的侧别。原因是此三类动作元件比较特殊，零序过电压和间隙过电流反映系统不接地时发生单相接地故障或间隙击穿的情况，失灵联跳动作的前提是本侧有失灵保护动作，均有比较明确的侧别特征，可以直接使用。

2) 出口判别

对于其他元件动作的情况，可先判别保护出口元件侧别，当出现先跳某一侧开关时，则认为故障发生在该侧。需要注意的是，此时判别的是出口元件而非动作元件，由于变压器保护比较特殊，元件动作后不一定先跳本侧开关，如高压侧过电流动作可能先跳开中压侧母联，此时通常是高压侧过电流的方向指向中压侧，因此可认为故障发生在中压侧而非高压侧。此判据的理论基础是现有保护配合相对完善，正常情况下保护不会越级跳闸。

3) 零序电流判别

若无法获取开关动作信息、保护仅启动未动作，或者动作时同时跳开各侧开关，则可进一步根据零序电流进行判别。如果装置仅一侧有零序电流，则认为故障在该侧，这是因为区外故障对于变压器为穿越特性，非故障侧不可能自行产生较大零序电流。

4) 方向判别

最后，如果各侧均有零序电流或者各侧均无零序电流，则通过方向元件进行判别。当各侧均有零序电流时，使用零序电流方向；当各侧均无零序电流时，使用相电流进行方向判别。

对于多侧电源的系统，方向判别比较准确，但变压器通常存在负荷侧，而负荷侧的方向与故障无明显关系。针对此类情况，本文提出一种按侧置数、汇总判别的方法。变压器各侧均设置一个判别位，其数字范围为 0, 1, 2，默认全为 1。进行方向判别前，先看本侧电流的大小，当本侧电流小于变压器额定电流时不进行判别，当本侧电流大于变压器额定电流时才判别。当判别方向指向本侧区外时，本侧判

别位置 2；当判别方向指向对侧（变压器区内）时，本侧判别位清 0；当本侧无电流时，本侧判别位清 0。数值设置完成后，将数值最大的侧作为故障侧。以较为简单的两圈变压器典型故障为例，考虑不同电源、负荷及故障位置的组合，得到判别结果见表 3。

表 3 不同电源和负荷情况下的判别结果

本侧电源	对侧电源	故障侧	结果（本侧/对侧）
有	有	本侧	2/0
有	有	对侧	0/2
有	无	本侧	1/1
有	无	对侧	0/2
无	有	本侧	2/0
无	有	对侧	1/1

由表 3 可见，多数情况下，该判别方式有效，但若无大穿越电流流过变压器，则依照上述方法可能出现多侧数据为 1 的结果，从而无法选出侧别，还需要增加其他判据。

5) 电压跌落判别

对于无大电流穿越变压器的情况，其原因通常为两种，一种是电源侧故障，另一种是强系统远端轻微故障。这两种情况下的故障电流都不大，可以使用电压进行辅助判别，根据电压的跌落程度区分是哪一种情况。

当任一側相电压 U_p 或相间电压 U_{pp} 低于门槛（取 70% 额定电压）时，可以认为是电源侧故障。对于提前设置好电源侧的，可以选电源侧；对于未设置的，可以选择高压侧，因为除特殊情况外，通常高电压等级的电网都存在电源，电厂升压变也不例外。

当 U_p 和 U_{pp} 均较大，超过门槛时，可认为是强系统远端轻微故障，此时可选择相电压变化量 ΔU_p 和相间电压的变化量 ΔU_{pp} 最大的一侧为故障侧。

3.4 区内故障侧判别

当故障发生在变压器内部时，一般纵差保护会动作，但纵差保护通常计算整体差流，并不包含侧别信息，因此需要通过其他信息进行故障侧判别。参考区外故障的定位方式，优先选择一些特征明显的差动保护，其次是零序电流，最后是电流电压信息判别。

1) 特殊动作元件判别

部分自耦变压器配置有小区差，当小区差动作时，可以认为是低压侧故障。此外，自耦变压器分

侧差动保护动作时,虽然不能确定是高压侧还是中压侧故障,但是可以排除低压侧。部分两圈/三圈变压器可以使用中性点零序电流和本侧开关/套管电流计算差流,该差动保护称为零差或限制性接地(restricted earth fault, REF)保护。该差动保护按侧配置,当其动作时,可以认为故障发生在其所在侧。

2) 电压元件判别

发生区内金属性故障时,通常有一侧相电压或相间电压较低,接近于0,而其他电源侧受主变压器漏抗的影响,电压不会太低,使用电压特征可以更好地判断故障位置。当仅一侧 U_p 或 U_{pp} 较小(门槛可取10%额定电压)时,可选该侧为故障侧。

如果多侧电压都低,很有可能是电源侧发生故障,导致负荷侧电压也降低。此时,可选电源侧为故障侧,电源侧无法确定时选高电压侧。

3) 电流元件判别

当所有侧电压均高时,可能为比较少见的轻微匝间故障或高阻故障。此时,进一步定位故障较困难,可以通过电流进行辅助判别。

对于多侧电源的情况,变压器区内故障通常会有多侧电流较大,受变压器漏抗的影响,故障侧的标么化电流更大。因此,当有多侧电流大于额定值或确认为多侧电源时,可以选择电流最大的一侧作为故障侧。

当前序判据仍然无法定位时,可以同时置各侧均故障标志。如果故障发生在本体,由于要进行变压器解体检查,电气量故障定位结果更多的是作为参考。

4 故障相判别

确认故障侧后,进一步根据故障性质进行故障相别定位。

4.1 区外故障相判别

首先判断是否发生了接地故障。当任一侧有零序电流时,可以认为发生了接地故障,并把故障相中的N置位。零序电流判别方法有多种,包括保护装置的零序保护启动、任一侧零序电流一次值大于门槛值(按习惯可取300A)或有较大的零序电压(可以取70%额定相电压)。

区外故障通常有后备保护启动或动作,可直接使用后备保护的启动或动作相别。

若现场仅保护启动,零序动作或无保护信息,此时需要通过故障侧的电压和电流量进一步判别。由于故障相电流通常较大,电压有一定跌落,可考

虑以下两种选相方法。

方法1:计算各相电压的 ΔU_p 。选 $\Delta U_p/\Delta U_{\min}>k$ 的相别为故障相(k 可取3),其中 ΔU_{\min} 为三相电压变化量的最小值,当三相都小于 k 时判别为三相故障。

方法2:通过各相电流的比例进行选相。 $I_p/I_{\min}>k$ 的为故障相(I_p 为相电流, k 可取1.2),其中 I_{\min} 为三相电流的最小值,当三相都小于 k 时判别为三相故障。

实际使用时,因为电压包含更清晰的故障特征,所以优先选择电压作为判据,也可以通过两种算法加权得出结果。

4.2 区内故障相判别

区内选相同样首先判别是否发生了接地故障。判别方法与区外故障类似,还可结合零序差动保护进行判别,零序差动保护动作也为接地故障。

发生区内故障后通常差动保护动作,但不同差动保护对相别选择的指示性并不相同。按从清晰到模糊排列,依次为分相差动、分侧差动、小区差、REF零差、纵差。按此优先级顺序选相:分相和分侧差动的动作相别可以直接指示故障相;小区差虽然有转角,但是仍是基于基尔霍夫定律的分相差动,可以根据折算至低压出线的差流得到相别;REF零差稍复杂,但其动作一般为接地故障情况,可以优先选择故障侧电压低于门槛值的相作为故障相,门槛值可取30%额定电压;纵差保护有转角和消零,相别选择较为复杂,下面单独进行讨论。

由于星角变换和多侧电源的影响,多数区内金属性故障通常仅一侧电压跌落比较严重,因此当仅一侧的 U_p 或 U_{pp} 低于定值(可取10%额定电压)时,选该相作为故障相。

如果电压跌落不明显,进一步通过差流进行判别。由于变压器可能存在分接头调整,正常运行时也可能有差流,因此选择差流变化量进行判别。根据第3节的故障侧判别结果,以及故障侧的联结方式进行不同处理。差流计算统一向故障侧转角。

对于故障侧为Y侧的情况,由于差流计算时会消零,所以典型单相故障时的故障相差流为非故障相差流的两倍且相位相反。相间故障时故障相差流通常比非故障相差流大很多,因此可以用二者幅值进行判别。选 $\Delta I_d/\Delta I_{d\min}>k$ 的相作为故障相(其中, ΔI_d 为差流变化量, $\Delta I_{d\min}$ 为三相差流变化量的最小值, k 可取1.2),如果三相都不满足,则选三相。

对于故障侧为D侧的情况,Y侧电流均采用两相相减的方式向D侧转,而D侧故障时其故障差流

可以指示故障相别,因此选择向 D 侧转角后满足动作条件的相别作为故障相。

5 仿真验证

为验证本文所提方法的有效性,使用实时数字仿真(real time digital simulation, RTDS)系统搭建模型,通过不同系统架构和不同故障类型的仿真进行分析,仿真平台接入实际保护设备以提供保护动作结果作为分析的输入量。部分仿真分析如下。

5.1 多侧电源仿真

变压器模型为 500kV/220kV/35kV 自耦变,容量为 800MV·A,高、中压侧均有电源。

高压侧区内 A 相接地故障波形如图 2 所示。保护纵差、分相差和分侧差动作,分相差和分侧差动作相别为 A。依照本文判据,仅高压侧电压满足判别条件,中压侧 A 相仍有一定幅值的电压,因此可以正确判断故障位于高压侧。同时,保护动作相别、电压判据、差流判据均可正确选出故障相为 A 相。

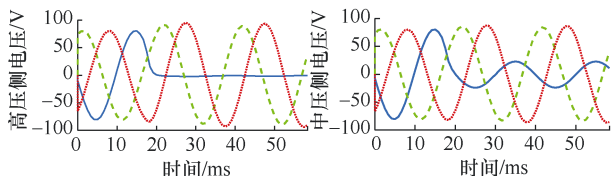


图 2 高压侧区内 A 相接地故障波形

低压侧区内 AB 相间故障波形如图 3 所示。保护纵差和小区差动作,小区差动作相别为 AB。依照本文判据,通过小区差动作可以正确选择故障侧和相别。此外,仅低压侧 AB 相间电压 U_{AB} 满足判别门槛,通过电压也可以做出正确选择。

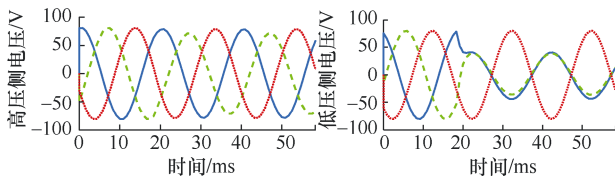


图 3 低压侧区内 AB 相间故障波形

高压侧匝间故障波形如图 4 所示。保护纵差和分相差动作,分相差动作相别为 A 相。波形中各侧电压变化不大,仅高压侧电流有增大趋势。依照本

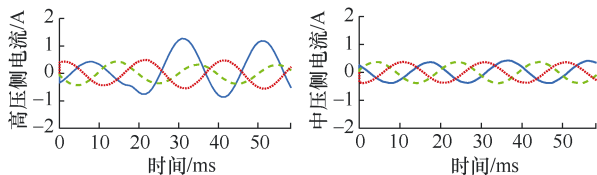


图 4 高压侧匝间故障波形

文判据,可选择故障侧别为高压侧。同时,根据保护动作相别和纵差差流特征可以判别故障相为 A 相。

5.2 单侧电源仿真

变压器模型为 500kV/35kV 两圈站用变压器,容量为 120MV·A,仅高压侧有电源,低压侧为负荷。

高压侧区外 A 相接地故障波形如图 5 所示。区外故障,保护仅启动。由波形可见,高压侧电压接近 0,由于仅高压侧有电源,高压侧电流呈现零序电流特征。根据第 3 节可选择故障侧为高压侧,同时 A 相电压跌落最大,可正确选择故障相为 A 相。

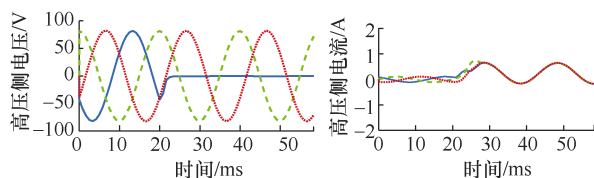


图 5 高压侧区外 A 相接地故障波形

低压侧区外 AB 相间故障波形如图 6 所示。区外故障,保护仅启动。由波形可见,高、低压电流反向。结合第 3 节判据,可判断故障发生在低压侧,同时可根据电压判别故障相为 AB 相。

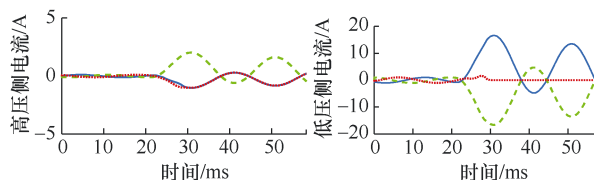


图 6 低压侧区外 AB 相间故障波形

6 结论

为提升变压器故障定位的自动化程度,本文对众多数据信息进行分层分类,给出一系列变压器故障定位判据,并根据各判据与故障特征的关联程度设置优先级,避免结果互斥。理论分析和仿真实验结果表明,本文所提方法可实现对现场绝大多数典型故障的正确定位。同时,本文所提出的判别架构具有较好的扩展性,可以根据不同应用场景搭建专用逻辑,还可以针对实际使用的系统和设备调整参数,增删完善逻辑。此外,本文方法不依赖高级智能算法,简洁高效,实用性强,最终判据和逻辑可用于装置内部选相,也可用于录波离线分析,还可用于主子站智能运维等高级诊断。

本文所提判别思路还存在以下不足:

1) 判别依赖保护装置的正确动作,若保护装置异常则会出现错误判别。

2) 判别尚未引入特殊测点, 如变压器的套管CT, 引入套管CT可与开关CT构成引线差动保护, 增强侧别和相别判别的准确度, 同时进一步确认故障位于引线上还是变压器内部, 有助于现场事故快速定位处理。

3) 部分判别门槛的设置基于理想工况, 对于极特殊工况, 如区内故障差动保护灵敏度不足而由后备保护动作的情况, 故障性质的判别不准确。对于非金属性故障, 远端故障判别准确度可能不足。在新能源等弱电源场景下的应用受限。对于多重故障或复杂转换性故障, 定位可能不准确, 需要进行人工核对。

4) 需要额外设置电源负荷类型、变压器及系统的接地方式等参数, 缺少参数时判别性能可能有所下降。

5) 如果想脱离保护装置使用录波器波形进行独立判别, 需要成套保护算法及相应的保护定值。

6) 对于内部故障, 还可以结合局部放电和色谱等信息更准确地定位故障并确定故障类型。

综上所述, 本文提出了变压器故障定位的系统性架构及相应推荐判据, 可以提升现场故障定位的准确度。同时, 针对特殊场景和现场的故障波形, 相应判据还可持续优化。

参考文献

- [1] 郭雅蓉, 柳焕章, 王兴国. 零序电流差动保护选相元件[J]. 电力系统自动化, 2017, 41(2): 155-159.
- [2] 俞波, 杨奇逊, 李营, 等. 同杆并架双回线保护选相元件研究[J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(4): 38-42.
- [3] 刘伟, 杨东风, 王洪志, 等. 基于格拉姆角场-改进残差网络的小电流接地系统故障选线[J]. 电气技术, 2023, 24(12): 14-19.
- [4] 吴建宇. 基于中电阻法的小电流接地选线方法研究[J]. 电气技术, 2023, 24(10): 17-22.
- [5] 辜超, 杨祎, 张晓星, 等. 基于最大相关最小冗余准则的变压器故障诊断特征选择[J]. 电工电能新技术,

2018, 37(7): 84-89.

- [6] 杜厚贤, 刘昊, 雷龙武, 等. 基于振动信号多特征值的电力变压器故障检测研究[J]. 电工技术学报, 2023, 38(1): 83-94.
- [7] 范慧芳, 咸日常, 王涛, 等. 改进朴素贝叶斯模型在电力变压器故障定位中的应用[J]. 高压电器, 2023, 59(2): 190-197.
- [8] 洪川, 舒鸿科. 色谱分析结合电气试验法在变压器故障定位中的应用[J]. 变压器, 2008, 45(11): 38-40.
- [9] 申文强, 王宗琳, 樊尚旭, 等. 基于IFOA-SVM的变压器故障诊断与定位研究[J]. 电工技术, 2023(12): 46-50.
- [10] 魏云冰, 王东晖, 韩立峰, 等. 一种基于MIA的油浸式变压器放电性故障定位新方法[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(21): 41-47.
- [11] 王兵, 陈益萍, 徐华生, 等. 变压器铁心及夹件接地电流在线监测装置[J]. 电气技术, 2023, 24(6): 69-73.
- [12] 梁志坚, 古斌, 谭建成. 不同故障类型不同转角方式下的变压器差流分析[J]. 电力系统保护与控制, 2009, 37(21): 71-76.
- [13] 吴昊天, 赵阳, 刘子卓, 等. 基于小波变换的配电变压器差动保护相位补偿方法[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(10): 76-83.
- [14] 索南加乐, 张军民, 许立强, 等. 基于Yn/△接线变压器零序纵差保护原理研究[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(16): 54-61.
- [15] 袁宇波, 李澄, 葛永高, 等. 复杂故障情况下的变压器差动保护动作特性分析[J]. 江苏电机工程, 2006, 25(5): 9-11.
- [16] 曹树江, 林榕, 魏颖莉. 单故障和复故障下变压器差动保护计算分析[J]. 中国电力, 2012, 45(5): 16-19.

收稿日期: 2024-08-02

修回日期: 2024-10-15

作者简介

张晓宇(1981—), 男, 吉林省吉林市人, 硕士, 正高级工程师, 主要从事电力系统继电保护研发工作。