

DOI:10.13296/j.1001-1609.hva.2017.02.007

基于控制回路的断路器永磁机构故障特征提取方法

赵 钰, 耿蒲龙, 许春雨, 宋建成

(太原理工大学煤矿电气设备与智能控制山西省重点实验室, 太原 030024)

摘要: 为了识别高压断路器故障模式并提取其故障特征,文中以ZNY1-10(6)/630-12.5型高压断路器永磁操作机构为研究对象,分析了断路器分合闸时操作机构的动作过程,在此基础上模拟了操作机构供电电压异常、分合闸线圈老化、触头及连杆机构卡涩、储能电容故障、辅助开关失效5种常见故障,选择控制回路中分合闸线圈电流和电容电压做为监测信号,确定并提取了对应特征量。提出了一种基于模糊理论的断路器故障特征提取算法,获得了故障与特征量变化的对应关系,实现对故障的区分、归类并达到辨识的目的,为高压断路器故障诊断及寿命评估提供了判断依据。

关键词: 永磁操作机构; 高压断路器; 特征提取; 模糊理论; 故障诊断

Fault Feature Extraction Method for the Circuit Breaker with Permanent Magnetic Mechanism Based on Control Loop

ZHAO Yu, GENG Pulong, XU Chunyu, SONG Jiancheng

(Taiyuan University of Technology, Shanxi Key Laboratory of Mining Electrical Equipment
and Intelligent Control, Taiyuan 030024, China)

Abstract: To recognize fault pattern and extract fault feature of an HV circuit breaker, the permanent magnetic mechanism of the ZNY1-10(6)/630-12.5 type HV circuit breaker is taken as an example to analyze the opening/closing movement of the permanent magnetic mechanism. Then five common failures, including the failure of the power supply, the aging of the opening/closing coil, the jamming of the contacts and linkage mechanism, the failure of the energy-storage capacitor, and the failure of the auxiliary switch, are simulated. The closing coil current, opening coil current and capacitor voltage of the control loop are selected as monitoring signals, and the related features are extracted. In order to distinguish and classify the failures and extract the features, a fault feature extraction algorithm is proposed based on the fuzzy theory. And the relationship between the failures and the features are obtained. This study may provide evidence for the HV circuit breaker fault diagnosis and remaining life evaluation.

Key words: permanent magnetic mechanism; HV circuit breaker; feature extraction; fuzzy theory; fault diagnosis

0 引言

断路器是电力系统中重要的控制和保护设备,其作用是投入或切除供电线路或电力设备,且当供电线路或电力设备发生故障能及时将故障区域

切除,避免故障扩大^[1]。当断路器本身出现故障时,极有可能造成电力系统更大规模的故障,严重时会导致局部供电系统瘫痪,造成重大损失。为了提高断路器运行可靠性,并为状态检修提供指导意见,有必要对其运行状态进行监测、分析和诊断。高压断路器故障种类繁多,需要处理的数据量大,如何

收稿日期:2016-08-15; 修回日期:2016-09-27

基金项目:国家自然科学基金面上项目(51377113);山西省科技重大专项(20131101029);山西省基础研究面上项目(2014011024-3)。

Project Supported by National Natural Science Foundation of China(51377113), Technology Major Projects of Shanxi Province (20131101029), Basic Research Projects of Shanxi Province(2014011024-3).

能准确、快速地对断路器即将发生的故障进行预警,并对已经发生的故障进行分析和诊断,确定故障的性质、类别、原因、部位,是对高压断路器故障诊断的最基本要求^[2]。

灭弧机构和操作机构是高压断路器的两大核心部件。据统计^[3-5]高压断路器操作机构机械故障占断路器总故障的40~44%,控制电路和辅助回路电气故障占总故障的20~29%。统计结果表明,操作机构机械故障及其控制回路故障占高压断路器故障的绝大多数,对高压断路器进行故障诊断所选择的监测信号要能够充分反映这两大类故障信息。通过控制回路电信号监测高压断路器操作机构故障是一种有效的手段,国内外有不少文献都提出了基于线圈电流信号的断路器故障监测与诊断的方法^[1,3,6-16]。文[13]通过监测分合闸线圈电流实现断路器机械故障的自动追踪,但其并没有反映出控制回路的完整性与可靠性。文[15]采用了概率统计的方法监测合闸电流来对断路器运行情况做整体评定,但其没能对分合闸过程做有效区分。文[17]首次提出了真空开关永磁机构储能电容失效的问题,将储能电容作为永磁机构的监测对象,利用最小二乘支持向量机预测电容故障,但这种算法是基于离线模式的,不能实时反映断路器状态。

操作机构电磁线圈电流和电压波形中包含着故障诊断所需的重要信息,同时能够反映控制回路完整性,且监测数据比较容易获得。因此,文中以ZNY1-10(6)/630-12.5型永磁操作机构高压断路器为研究对象,提出将控制回路中分合闸线圈电流和储能电容电压作为永磁机构高压断路器故障诊断的监测对象,结合实际模拟了操作机构供电电压异常、分合闸线圈老化、触头及连杆机构卡涩、储能电容故障、辅助开关失效5类常见故障,提取了17种特征量,并依据模糊集合理论算法提取故障特征并分析,为故障诊断提供了判断依据。

1 永磁操作机构及特征量确定

1.1 永磁操作机构

永磁操作机构主要由永久磁铁、合闸线圈和分闸线圈组成,与弹簧操作机构和电磁操作机构相比,具有结构简单、故障源少、动作时与真空灭弧室的反力特性匹配最好等诸多优点^[18],因而其应用最为广泛。

文中研究对象为双稳态永磁操作机构,其控制单元结构见图1。图1中:①为开关电源,将交流电转化为直流电为储能电容充电;②为储能电容,容

量较大,其作用是为分合闸线圈提供瞬间大电流,保证在分合闸时线圈产生足够大的电磁力驱动铁心运动;③为分闸接触器;④为合闸接触器,其作用是利用主接点来开闭电路,用辅助接点来执行控制指令;⑤为降压变压器,负责将一次侧高压电变为低压电,并经过整流后供给接触器线圈。

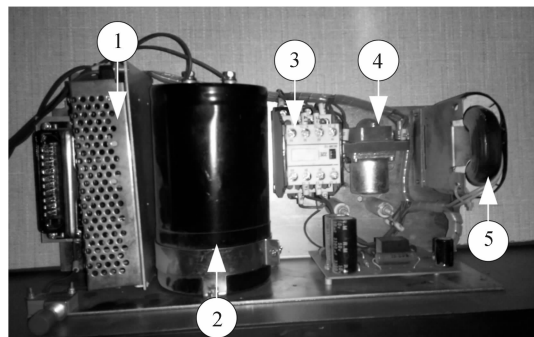


图1 永磁操作机构控制单元

Fig. 1 Control unit of the permanent magnetic operating mechanism

1.2 分合闸过程

当分合闸线圈内通有瞬间大电流时,动铁心在电磁力作用下动作,使断路器合闸或分闸。线圈电流波形中包含着丰富的状态信息,能够反映出电磁铁本身及其所控制的连杆机构和触头在分合闸过程中的工作状态,根据合闸线圈电流波形,将合闸过程分为以下4个阶段^[12,19]:

1)铁心触动阶段。合闸线圈电流见图2, t_{a0} 时刻为断路器合闸命令到达时刻,是计时起点。 $t_{a0}-t_{a1}$ 期间,合闸线圈电流一直上升,其产生的电磁力还不足以使动铁心运动。合闸过程中储能电容电压见图3。在 t_{c1} 之前 U_{c1} 一直保持不变, t_{c1} 之后储能电容向合闸回路放电,电压下降的同时合闸电流迅速上升。

2)动铁心运动阶段。 t_{a1} 时刻为线圈中电流、磁通足以驱动铁心运动的时刻。 $t_{a1}-t_{a2}$ 间,动铁心在电磁力的作用下,克服了重力、弹簧力等阻力,开始加速运动,直到铁心撞到支持部分为止。根据这一阶段的电流波形,可以诊断铁心结构有无卡涩以及脱扣的情况。

3)触头合闸阶段。 t_{a2} 时刻为动铁心运动停止时刻,连杆带动触头在 t_{a2} 前后开始运动。 t_{a3} 时刻为连杆接触到行程开关的时刻,此时行程开关常开触点闭合,接通维持回路,储能电容同时向合闸线圈与维持回路放电,线圈电流减小。

t_{a3} 时刻接通维持回路, t_{a4} 时刻再切断辅助触点,在合闸线圈电流减小之后切断主控制回路,减小了辅助触点之间的电弧。储能电容在 t_{c2} 时刻放电

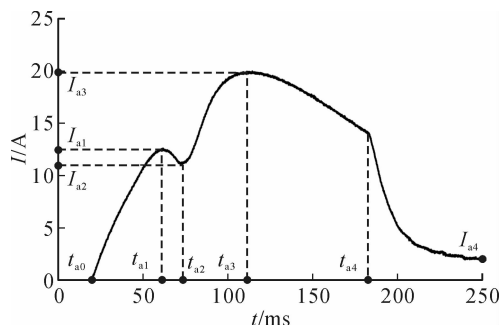


图2 合闸线圈电流及其对应特征量

Fig. 2 The features of close coil current

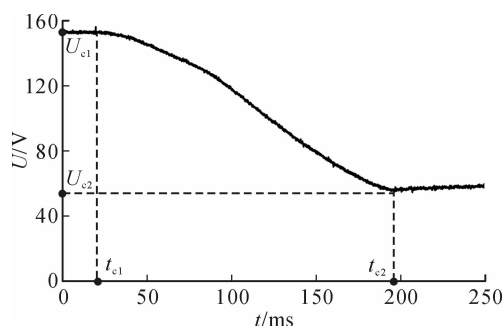


图3 储能电容电压及其对应特征量

Fig. 3 The features of energy-storage capacitor voltage

完毕,其对应最低电压 U_{c2} ,这一时刻反映的是电容放电时间,依据放电时间常数可以诊断电容是否存在故障。之后储能电容又开始充电,为分闸动作做好准备。

4)电流维持阶段。 t_{a4} 时刻辅助开关触点断开,合闸线圈切换到维持回路,电流加速减小,直到最后电流趋于平稳。 I_{a4} 为维持电流,该电流值很小,其产生的电磁力用以克服操作机构自身阻力,使触头保持在合闸状态。

与合闸动作过程不同,断路器分闸之后控制电路不需要进入维持状态。为了保证可靠灭弧,分闸时有分闸弹簧的作用,可以提高分闸操作的动作速度。分闸过程主要分为以下两个阶段:

1)铁心触动阶段。分闸线圈电流波形见图4。 t_{b0} 时刻分闸线圈电流开始上升,其产生的电磁力还不足以使铁心运动,电流一直上升,直到 t_{b1} 时刻为止,此时对应最大电流 I_{b1} 。 I_{b1} 可以反映出分闸时反作用力的大小,从而可以间接判断分闸时是否有卡涩,以及分闸弹簧是否存在问题。

2)铁心运动阶段。在 t_{b1} 时刻之后,铁心在分闸弹簧和分闸线圈产生电磁力的共同作用下开始运动,分闸线圈电流下降,直到 t_{b2} 之后电流趋近于零。选择 t_{b2} 作为特征量可以反映出断路器总的分闸时间。

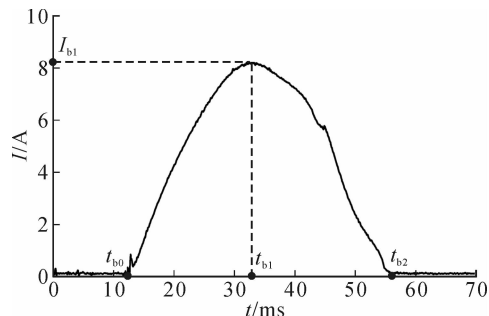


图4 分闸线圈电流及其对应特征量

Fig. 4 The features of open coil current

1.3 特征量统计

实际上,因制造工艺、运行工况等因素的影响,同一型号的不同断路器的特征量大小肯定会有区别,即便是同一台断路器在不同时刻的特征量也会有一定程度的分散性。因此,要想准确判断断路器的运行状态,有必要对其正常工况下的状态信号进行多次采集,将提取到的特征量统计分析,并为特征量设定一个对应于正常工况的阈值范围。

对断路器正常动作时的分合闸数据进行了20次采集,统计分析特征量的波动范围,统计数据见表1、2。

表1 正常情况特征量及波动范围

Table 1 Normal features and its range

特征量	正常情况	
	平均值	波动范围
I_{a1}/A	12.67	12.72~12.60
I_{a2}/A	11.16	11.09~11.22
I_{a3}/A	19.79	19.57~19.92
I_{a4}/A	2.15	2.04~2.29
t_{a0}/ms	20.93	19.27~21.86
t_{a1}/ms	64.02	61.79~64.72
t_{a2}/ms	74.68	72.19~75.15
t_{a3}/ms	114.73	112.13~117.95
t_{a4}/ms	184.31	183.04~184.79
I_{b1}/A	8.13	8.08~8.22
t_{b0}/ms	11.98	11.49~12.65
t_{b1}/ms	32.89	31.80~33.69
t_{b2}/ms	56.36	55.92~56.78
U_{c1}/V	152.30	149.94~153.23
U_{c2}/V	53.79	51.91~54.43
t_{c1}/ms	21.17	21.10~21.23
t_{c2}/ms	178.80	176.88~179.49

2 故障模拟试验及特征提取

2.1 电源电压异常

断路器实际运行时,控制回路通过电压互感器

表2 正常情况特征量的变化率

Table 2 Normal features and its change rate

特征量	I_{a1}	I_{a2}	I_{a3}	I_{a4}	t_{a0}	t_{a1}	t_{a2}	t_{a3}	t_{a4}
变化率/%	-0.55~0.39	-0.63~0.54	-1.11~0.66	-5.12~6.51	-7.93~4.44	-3.48~1.09	-3.33~0.63	-2.27~2.81	-0.69~0.26
特征量	I_{b1}	t_{b0}	t_{b1}	t_{b2}	U_{c1}	U_{c2}	t_{c1}	t_{c2}	—
变化率/%	-0.62~1.11	-4.09~5.59	-3.31~2.43	-0.78~0.75	-1.55~0.61	-3.50~1.19	-0.33~0.28	-1.07~0.39	—

(6 kV/100 V)从主回路获取电能。在控制回路中 100 V AC 主要分成两路,一路通过开关电源将交流电转换为直流电(155 V DC)为电容储能。另一路通过变压器将 100 V 交流电降压、整流后供给接触器线圈,其中降压变压器如图 1 中⑤所示。通过改变供电电压和开关电源电压模拟电源异常情况,观测并分析特征量的变化。

利用一台 0~200 V 的交流调压器改变交流输入电压,模拟交流输入电压以及降压变压器故障。分别拾取交流输入电压为 100、90、70 V 时的合闸线圈电流,波形见图 5。

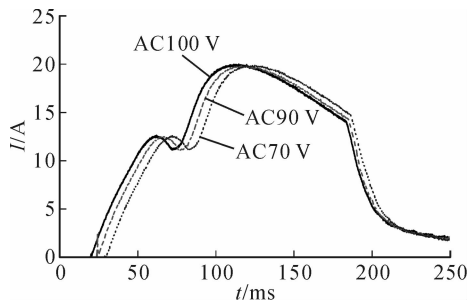


图5 交流电压改变时合闸线圈电流

Fig. 5 Effect of AC voltage variations on close coil current

提取交流电压变化时的特征量,与表 1 中正常情况下的特征量对比可知,当交流输入电压为 90 V 时响应时间 t_{a0} 比 100 V 时增加了 21.12%;当交流输入电压为 70 V 时响应时间延长了 51.00%,而相应时刻的电流 I_{a1} 、 I_{a2} 、 I_{a3} 、 I_{a4} 最大变化率只有 1.21%。结合图 5 和表 1 可知,线圈响应合闸命令的时间 t_{a0} 随着电压的降低逐渐变长,之后各个时刻都向右移动,而对应时刻的电流值变化不大。

另外,由于储能电容是直流供电,当交流电压变化时对其影响不大,故当交流电压变化时不选储能电容参数做特征量,见图 6。当交流电压减小时,分闸线圈响应时间 t_{b0} 也相应增加,同时峰值电流 I_{b1} 减小;在交流输入电压为 70 V 时峰值电流减小了 6.05%,超出了正常范围。

通过改变开关电源的输出电压来模拟开关电源故障。实验所用的开关电源输出直流电压调节范围为 138~162 V,选取 139.3、149.5、161.9 V 3 种直流输出情况,分别拾取合闸与分闸线圈电流波形以

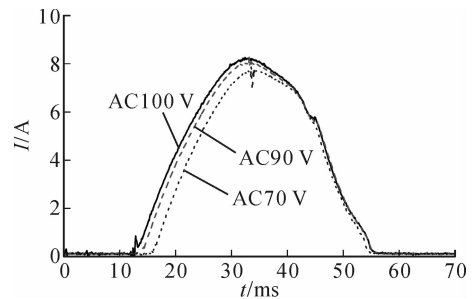


图6 交流电压改变时分闸线圈电流

Fig. 6 Effect of AC voltage variations on open coil current

及储能电容电压波形,见图 7~9。

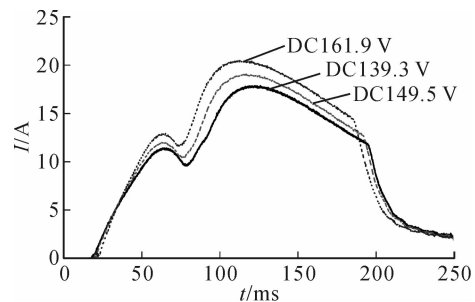


图7 直流电压改变时合闸线圈电流

Fig. 7 Effect of DC voltage variations on close coil current

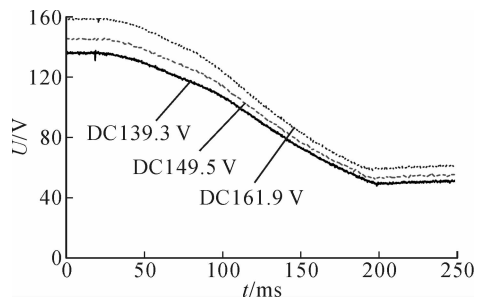


图8 直流电压改变时电容电压

Fig. 8 Effect of DC voltage variations on capacitor voltage

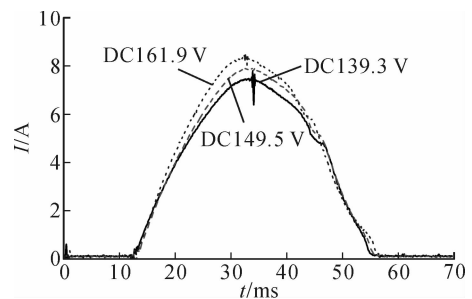


图9 直流电压改变时分闸线圈电流

Fig. 9 Effect of DC voltage variations on open coil current

由于开关电源直接给储能电容供电, 储能电容为分合闸线圈提供能量, 当开关电源输出电压变化较大时, 相应线圈的电流以及储能电容电压变化也较大。当开关电源电压升高时, 线圈响应时间 t_{a0} 、 t_{b0} 不变, 总的分合闸时间变化也不大, 合闸电流和分闸电流波形峰值都增加。特别是合闸阶段动铁心动作时间 t_{a2} 也增加, 如直流电压 161.9 V 时的动作时间比 139.3 V 时增加了 7.33%, 可见直流电压大小对动铁心动作时间影响较大。

2.2 分合闸线圈及储能电容故障

实际中由于分合闸线圈老化或者受到氧化与腐蚀会导致线圈电阻增大, 另外电路虚接、储能电容老化也会导致回路电阻增大, 继而会影响线圈励磁电流。另外, 线圈回路直流电阻增加会引发线圈发热量增加, 严重时甚至会烧毁线圈^[19]。

模拟回路电阻增加, 可在主回路中串联接入相应阻值的电阻实现^[13]。正常情况下测量合闸线圈电阻为 5 Ω , 分闸线圈电阻为 8 Ω 。模拟回路电阻增加率不超过回路最大阻值的 20%, 即回路电阻最大增加 2 Ω , 选取 0.2 Ω (2 个)、0.5 Ω (3 个) 100 W 的水泥电阻。电阻串联可以组成 0.2~1.9 Ω 总共 11 种不同的电阻值。正常分合闸时和电阻增加 0.6、1.9 Ω 时, 拾取合闸线圈电流波形、储能电容电压波形和分闸线圈电流波形, 见图 10~12。

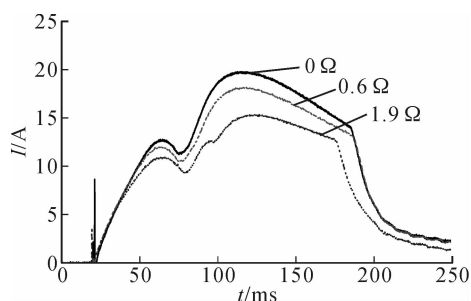


图 10 回路电阻变化时合闸线圈电流

Fig. 10 Effect of loop resistance variations on close coil current

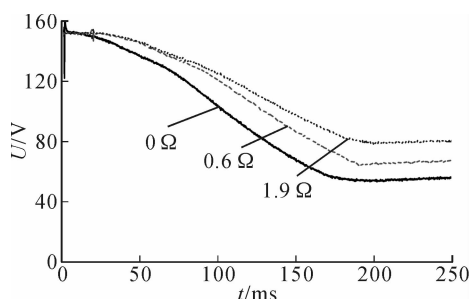


图 11 回路电阻变化时电容电压

Fig. 11 Effect of loop resistance variations on capacitor voltage

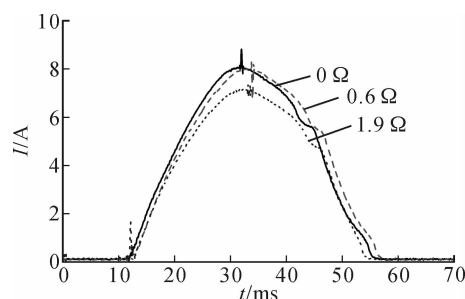


图 12 回路电阻变化时分闸线圈电流

Fig. 12 Effect of loop resistance variations on open coil current

从图 10~12 可以看出, 当电阻增加时, 合闸线圈电流峰值减小, 储能电容最低电压 U_{c2} 增加, 放电时间 t_{c2} 也相应增加, 分闸线圈电流峰值 I_{b1} 也随着电阻增加而减小。当电阻增加至 1.9 Ω 时虽然能正常分合闸, 但是辅助触点提前动作, 合闸电流波形发生严重畸变, 特征量变化非常明显。

2.3 触头及连杆机构卡涩

转轴生锈或者润滑液不足时会导致触头或者连杆机构卡涩, 进而会影响到铁心运动阶段的分合闸参数。厂家提供的触头正常工作的压力是 (1 000±50) N, 通过在传动拐臂转轴上施加作用力, 可以模拟上述故障。正常分合闸和作用力为 45、50 N 时, 分别拾取合闸线圈电流波形、储能电容电压波形和分闸线圈电流波形, 见图 13~15。

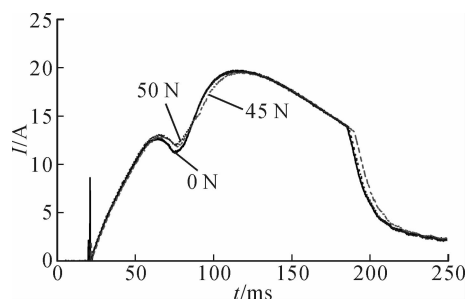


图 13 机构卡涩时合闸线圈电流

Fig. 13 Effect of mechanism jammed on close coil current

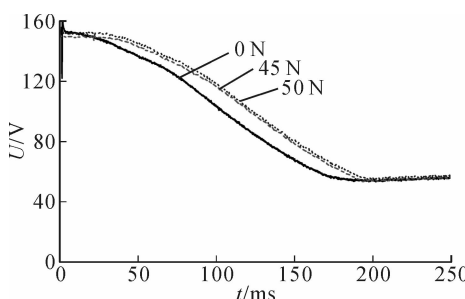


图 14 机构卡涩时电容电压

Fig. 14 Effect of mechanism jammed on capacitor voltage

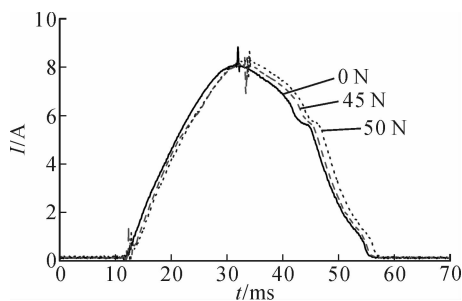


图 15 机构卡涩时分闸线圈电流

Fig. 15 Effect of mechanism jammed on open coil current

从图 13 中可以看出,当机构卡涩时动铁心触头阶段参数变化不大,在铁心运行阶段,施加 50 N 作用力时铁心运动结束时电流 I_{a2} 增加了 6.82%。对于储能电容,当阻力增加时放电时间增加,而最低电压变化不大,见图 14。图 15 反映出当阻力增加时,分闸线圈电流波形峰值增加,各个动作时刻延迟。

2.4 辅助开关失效

辅助开关是永磁机构控制单元的一部分,其作用是在断路器合闸结束阶段切断线圈回路大电流,或是将线圈回路切换至维持回路,不同型号的断路器作用不同,但其目的都是将线圈回路电流迅速减小。在实际运行当中,开合瞬间电流过大、开关触点磨损或者开关触点行程位置不当,都有可能引起辅助开关失灵(触点弹跳或延迟关断)。辅助开关如果失灵会导致两种后果:一是线圈中持续通过大电流,严重时会导致线圈烧毁;二是导致回路断路或者回路电阻增大。

通过断开辅助开关与合闸线圈的接点和在辅助回路中串联电阻,模拟辅助开关故障。辅助开关只影响合闸回路而对分闸回路没有影响。正常时、辅助开关触点断开和辅助开关触点串接 1.6 Ω 电阻时,分别拾取合闸线圈电流波形、储能电容电压波形,见图 16、17。

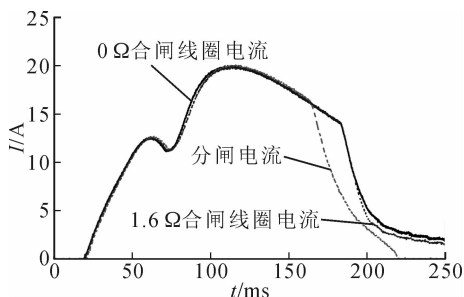


图 16 辅助开关故障时合闸线圈电流

Fig. 16 Effect of auxiliary switch failure on close coil current

从图 16 中可以看出,当辅助开关断开时,合闸线圈电流没有进入维持阶段,在 t_{a3} 之后电流迅速减

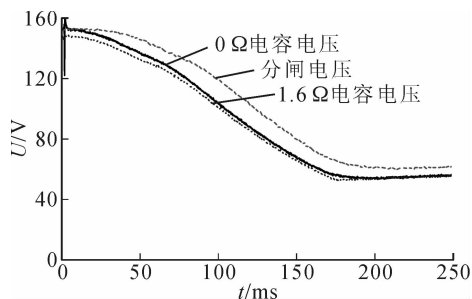


图 17 辅助开关故障时电容电压

Fig. 17 Effect of auxiliary switch failure on capacitor voltage

小为 0,储能电容放电时间 t_{c2} 延长,最低电压 U_{c2} 增加。当串入 1.6 Ω 电阻时辅助开关动作时间不变,维持电流 I_{a4} 减小了 30.27%。

3 信号特征分析

断路器故障和特征量不是一一对应的,并且从正常状态到故障状态是一个量变到质变的过程^[2]。故障征兆与引起原因存在不确定性,所以可以采用模糊理论来辨识二者之间的关系。结合高压断路器自身故障状况,文中提出了一种基于模糊理论的故障特征提取方法,确定了模糊隶属函数和模糊关系规则库。

将特征量模糊归一化,定义 (a, b) 为正常情况下特征量的范围。特征量超出正常范围时为 1,低于正常范围时为 -1,其隶属函数为

$$\mu(x) = \begin{cases} -1 & x \leq a \\ \frac{2x-a-b}{b-a} & a < x < b \\ 1 & x \geq b \end{cases} \quad (1)$$

特征量如果超出正常范围(见表 1、2),则可以判定断路器工作异常或者有某种故障趋势。结合上述实验结果,统计各故障与特征量的对应关系见表 3。

从表 3 中可以直观地看出,特征量与故障的对应关系,同时也确定了故障模糊关系规则库。例如,对于交流电压输入异常时有如下规则:

IF $\{t_{a0}, t_{a1}, t_{a2}, t_{a3}, t_{a4}, t_{b0}\}$ 为 -1, I_{b1} 为 1, THEN 交流输入电压升高;

IF $\{t_{a0}, t_{a1}, t_{a2}, t_{a3}, t_{a4}, t_{b0}\}$ 为 1, I_{b1} 为 -1, THEN 交流输入电压降低。

对于其他故障,以此类同。

在确定了故障类型的基础上,为了进一步诊断故障程度,还需要确定一个量化指标来评定故障等级。为此,对提取到的每一个特征量,计算其偏离正常情况平均值(见表 1、2)的程度。如交流电压降低时对应特征量计算结果见表 4、5。

表 3 故障与特征量的对应关系

Table 3 Relationship between features and failures

特征量	交流电压异常		直流电压异常		回路电阻增加			辅助回路故障	
	电压升高	电压降低	电压升高	电压降低	合闸线圈	分闸线圈	储能电容	卡涩	电阻增加
I_{a1}/A	—	—	1	-1	-1	—	-1	1	—
I_{a2}/A	—	—	1	-1	-1	—	-1	-1	—
I_{a3}/A	—	—	1	-1	-1	—	-1	—	-1
I_{a4}/A	—	—	—	—	-1	—	-1	—	-1
t_{a0}/ms	-1	1	—	—	—	—	—	—	—
t_{a1}/ms	-1	1	—	—	—	—	—	1	—
t_{a2}/ms	-1	1	-1	1	1	—	1	1	—
t_{a3}/ms	-1	1	-1	1	1	—	1	—	—
t_{a4}/ms	-1	1	-1	1	-1	—	-1	1	-1
I_{b1}/A	1	-1	1	-1	—	-1	-1	1	—
t_{b0}/ms	-1	1	—	—	—	—	—	—	—
t_{b1}/ms	—	—	—	—	—	—	—	1	—
t_{b2}/ms	—	—	—	—	—	-1	-1	1	—
U_{c1}/V	—	—	1	-1	—	—	—	—	—
U_{c2}/V	—	—	1	-1	—	1	1	-1	1
t_{c1}/ms	—	—	1	-1	1	1	1	1	—
t_{c2}/ms	—	—	-1	1	1	1	1	1	—

表 4 交流输入电压减小时的特征量值

Table 4 Features of the AC voltage drop

特征量	记录值	正常值
t_{a0}/ms	29.30	20.93
t_{a1}/ms	71.95	64.02
t_{a2}/ms	82.79	74.68
t_{a3}/ms	119.64	114.73
t_{a4}/ms	186.23	184.31
I_{b1}/A	7.70	8.13
t_{b0}/ms	15.40	11.98

取偏离程度最大值作为评价故障等级的量化指标,则该交流电压降低的故障程度为 28.57%。

综上,高压断路器永磁操作机构故障特征提取

表 5 交流输入电压减小时的特征量的偏离程度

Table 5 Deviation of the AC voltage drop

特征量	t_{a0}	t_{a1}	t_{a2}	t_{a3}	t_{a4}	I_{b1}	t_{b0}
偏离程度/%	28.57	11.02	9.80	4.10	1.03	-5.58	22.21

分以下 3 步:

1)采集断路器分合闸时线圈电流和储能电容电压信号,对信号滤波之后,提取对应特征量。

2)结合隶属函数 $\mu(x)$ 和模糊关系规则库(见表 3)确定故障类别。

3)计算各个特征量偏离正常情况的偏离程度,取最大偏离量,确定故障程度。

4 结论

文中在分析高压断路器永磁机构故障机理的基础上,结合实际模拟高压断路器永磁操作机构故障,提取了分合闸线圈电流以及储能电容电压信号的故障特征,实现了对永磁机构故障特征有效提取。具体结论如下:

1)交流输入电压影响线圈对分合闸命令的响应时间,对断路器铁心动作过程影响不大。直流电压影响分合闸线圈峰值电流和储能电容峰值电压,对断路器动作时间影响不大。

2)分合闸线圈老化会导致线圈电流峰值减小,储能电容老化引起的等效串联电阻增加,会使储能电容放电时间变长,电压波峰及波谷变化不大。

3)触头及连杆机构卡涩时会影响到动铁心动作时间以及这一阶段对应的电流波形,同时储能电容电压也会增加。辅助开关故障会影响到合闸时辅助开关动作阶段,对其他阶段影响不大。

4)基于模糊理论的故障特征提取算法可以简单、快速地识别出断路器故障,其结论可以作为断路器故障诊断、预警以及寿命评估的依据。

参考文献:

- [1] KEZUNOVIC M, NAIL C, REN Z, et al. Automated circuit breaker monitoring and analysis[C]//Power Engineering Society Summer Meeting. [S.l.]:IEEE, 2002:559-564.
- [2] 黄凌洁, 王 玮, 吴振升, 等. 基于模糊理论的高压 SF₆ 断路器故障诊断模型的研究[J]. 高压电器, 2008, 44(3): 246-249.
HUANG Lingjie, WANG Wei, WU Zhensheng, et al. Diagnosis model of HV SF₆ circuit breaker based on fuzzy theory[J]. High Voltage Apparatus, 2008, 44(3): 246-249.
- [3] ANDRUSCA M, ADAM M, PANTELIMON R, et al. About diagnosis of circuit breakers[C]//2013 8th International Symposium on Advanced Topics in Electrical Engineering

- (ATEE). [S.l.]: IEEE, 2013: 1-4.
- [4] ZHANG X, ZHANG J, GOCKENBACH E, et al. Life management of SF₆ circuit breakers based on monitoring and diagnosis[J]. Electrical Insulation Magazine, 2009, 25(3): 21-29.
- [5] SWEETSER C, BERGMAN W J, MONTILLET G, et al. Strategies for selecting monitoring of circuit breakers[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2002, 17(3): 742-746.
- [6] ZHONG Chongshan, YANG Rengang, CUI Jie. Mathematical morphology method for pre-processing of coil current waveforms of circuit breakers[C]//Power and Energy Engineering Conference (APPEEC). Asia-Pacific: IEEE, 2010: 1-4.
- [7] KNEZEVIĆ M, DJEKIĆ Z, KEZUNOVIĆ M. Automated circuit breaker monitoring[C]//Power Engineering Society General Meeting. [S.l.]: IEEE, 2007: 1-6.
- [8] LYU Jinbo, WANG Yi, XIE Jiangjian, et al. An efficient method for improving switching reliability of permanent magnetic vacuum circuit breaker[C]//2011 1st International Conference on Electric Power Equipment Switching Technology (ICEPE-ST). [S.l.]: IEEE, 2011: 233-236.
- [9] KEZUNOVIĆ M, REN Z, LATISKO G, et al. Automated monitoring and analysis of circuit breaker operation[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2005, 20(3): 1910-1918.
- [10] JOHAL H, MOUSAVI M J. Coil current analysis method for predictive maintenance of circuit breakers[C]//Transmission and Distribution Conference and Exposition. [S.l.]: IEEE/PES, 2008: 1-7.
- [11] BISWAS S S, SRIVASTAVA A K, WHITEHEAD D. A real-time data-driven algorithm for health diagnosis and prognosis of a circuit breaker trip assembly[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2015, 62(6): 3822-3831.
- [12] FOROOTANI A, AFZALIAN A A, MELLI A. Circuit breaker coil modeling and operation monitoring using feature extraction[C]//Innovative Smart Grid Technologies-Asia (ISGT Asia). [S.l.]: IEEE, 2012: 1-6.
- [13] RAZI-KAZEMI A A, VAKILIAN M, NIAYESH K A. Circuit-breaker automated failure tracking based on coil current signature[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2014, 29(1): 283-290.
- [14] STRACHAN S M, MCARTHUR S D, STEPHEN B A, et al. Providing decision support for the condition-based maintenance of circuit breakers through data mining of trip coil current signatures[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2007, 22(1): 178-186.
- [15] STRACHAN S, MCARTHUR S, MCDONALD J, et al. Trip coil signature analysis and interpretation for distribution circuit breaker condition assessment and diagnosis[C]//18th International Conference and Exhibition on Electricity Distribution. [S.l.]: IEEE, 2005: 1-5.
- [16] STEPHEN B, STRACHAN S M, MCARTHUR S, et al. Design of trip current monitoring system for circuit breaker condition assessment[J]. IET Generation Transmission & Distribution, 2007, 1(1): 89-95.
- [17] 牟龙华, 刘晓明, 张鑫. 永磁操作机构储能电容的状态评估与预测[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2013, 41(12): 1903-1909.
- MOU Longhua, LIU Xiaoming, ZHANG Xin. Condition assessment and prediction of energy-storage capacitors used in permanent magnetic mechanism[J]. Journal of Tongji University(Natural Science), 2013, 41(12): 1903-1909.
- [18] 李永祥, 林莘, 马跃乾, 等. 高压断路器新型电机操动机构的研究[J]. 电气技术, 2008(9): 79-83.
- LI Yongxiang, LIN Xin, MA Yueqian, et al. The research of high voltage circuit breaker with new motor operation structure[J]. Electrical Engineering, 2008(9): 79-83.
- [19] 席世友. 真空断路器电容器回路故障原因分析[J]. 高压电器, 2010, 46(5): 65-69.
- XI Shiyou. Cause analysis of capacitor circuit of vacuum circuit breaker fault[J]. High Voltage Apparatus, 2010, 46(5): 65-69.
- 赵钰(1990—), 男, 硕士在读, 主要从事高压断路器在线监测与故障诊断及预警方面的研究。
- 耿蒲龙(1982—), 男, 讲师, 博士研究生, 从事智能电器技术、煤矿安全生产监测监控系统及故障诊断技术的研究。
- 许春雨(1970—), 男, 副教授, 硕士生导师, 主要从事开关电源技术、谐波抑制与无功功率补偿等方面的研究。
- 宋建成(1957—), 男, 教授, 博士生导师, 研究方向为电气工程学科矿用智能电器、电力设备寿命评估、电力系统继电保护、煤矿安全监测监控等领域。

版权声明:

本刊已许可中国学术期刊(光盘版)电子杂志社在中国知网及其系列数据库产品中以数字化方式复制、汇编、发行、信息网络传播本刊全文。该社著作权使用费与本刊稿酬一并支付。作者向本刊提交文章发表的行为即视为同意我编辑部上述声明。

《高压电器》编辑部