

DOI:10.13296/j.1001-1609.hva.2024.12.029

基于电机输出功率的隔离开关机械故障检测技术研究

马宏明¹, 钱国超¹, 赵现平¹, 阮江军², 刘宇飞²

(1. 云南电网有限责任公司电力科学研究院, 昆明 650217; 2. 武汉大学电气工程学院, 武汉 430072)

摘要: 高压隔离开关在变电站中用量较多,其运行状态对电网安全稳定运行影响较大,但由于高压隔离开关长期暴露于户外环境,容易出现各种机械缺陷。文中提出一种基于电机输出功率的隔离开关机械故障检测技术,通过检测隔离开关动作过程中电机的电压与电流,获得电机输入功率,进一步减去在电机内部传递过程中的功率损耗,得到电机输出功率,可以有效避免电机功率损耗对测试结果的影响。针对电力系统中常用4种110 kV及以上电压等级的隔离开关典型波形进行分析,明确各段波形波峰波谷的位置及对应机械状态,为后续机械故障诊断提供指导,并经现场测试验证了其有效性。

关键词: 隔离开关; 机械故障; 输出功率; 电机功率损耗

Research on Mechanical Fault Detection Technology of Disconnecter Based on Output Power of Motor

MA Hongming¹, QIAN Guochao¹, ZHAO Xianping¹, RUAN Jiangjun², LIU Yufei²

(1. Electric Power Research Institute, Yunnan Power Grid Co., Ltd., Kunming 650217, China;

2. School of Electrical Engineering, Wuhan University, Wuhan 430072, China)

Abstract: High voltage disconnector is widely used in substation, and its operation status has a great impact on safe and stable operation of power grid. However, it is likely to occur various mechanical defects due to long term exposure to the outdoor environment. In this paper, a kind of mechanical fault detection technology of disconnector based on output power of motor is proposed. The input power of the motor is obtained by detecting the voltage and current of the motor during the operation of the disconnector. The output power of the motor is obtained by subtracting the power loss during internal transmission of the motor, which can effectively avoid the influence of the motor power loss on the test results. The typical waveform of four kinds of disconnectors at 110 kV and above, which are commonly used in power system, are analyzed to confirm the positions of waveform peaks and troughs and corresponding mechanical states of each section, provide guidance for subsequent mechanical fault diagnosis and its effectiveness is verified by field test.

Key words: disconnector; mechanical fault; output power; motor power loss

0 引言

高压隔离开关是电力系统中用量最多的变电一次设备,主要用于隔离电源、倒闸操作、拉合无电流或小电流电路等,具有数量多、分布广的特点,电网公司每年耗费大量人力、物力、财力对其进行运维以保证其安全稳定运行^[1-2]。

高压隔离开关多数工作于户外环境,由于制造工艺参差不齐、安装调试不到位、运行环境恶劣、检修维护不及时等情况,容易出现各种机械缺陷^[3]。据统计,2016—2020年云南电网110 kV及以上隔离开关发生紧急、重大缺陷597台,其中机械缺陷328台,占比54.94%。

针对隔离开关机械缺陷检测,部分主流制造厂

出厂时采用输出轴植入力矩传感器进行质量管控,但现场无法实施^[4];文[5]提出采用输出轴粘接电阻应变片进行检测,但检测结果受贴片安装状况影响大、稳定性差、准确度低,无法作为有效判断依据;文[6-7]等考虑到每台隔离开关都会配备摇手柄,进而设计了一款内置力矩传感器的摇手柄,可以实时记录手摇时的操作力矩,但实测发现测量结果受手摇速度影响大,重复性差,无法作为判断依据;云南电科院等提出一种外置步进电机、转角传感器、力矩传感器的隔离开关操作力矩—转角检测技术,但由于成套装置较大,现场实施困难^[8-9];清华大学等采用电机电流进行诊断,但实测发现,电机电流随现场电网电压存在波动,电流波形重复性差,根据电流进行状态判断困难^[10-25];云南电科院等尝试通过电机输入功率进行判断,但由于电机损耗问题,输入功率曲线也存在类似波动^[26-27]。

文中提出一种基于电机输出功率的隔离开关机械故障诊断技术,通过检测隔离开关动作过程中电机的电压与电流,根据检测的电压电流数据计算电机的输入功率,在此基础上减去功率在电机内部传递过程中的功率损耗,得到电机输出功率,有效避免电机功率损耗对测试结果的影响。同时,可以结合隔离开关运动过程将输出功率曲线进行分段,根据每段波峰波谷的位置及峰值,实现隔离开关机械故障的判断与故障定位。

1 检测原理

110 kV 及以上电压等级的隔离开关主要依靠异步电机进行驱动,电机输出转矩与电机输出功率之间的关系为

$$T_2 = \frac{P_2}{\Omega} \quad (1)$$

式(1)中: T_2 为电机输出转矩; P_2 为电机输出功率; Ω 为转子自身的角速度。

功率在异步电机中的传递关系见图1。

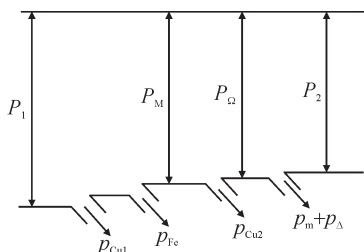


图1 异步电机功率传递

Fig. 1 Power transfer of asynchronous motor

图1中: P_1 为输入功率; p_{Cu1} 为消耗在定子电阻上的铜耗; p_{Fe} 为消耗在励磁电阻上的铁耗; P_M 为

入功率通过电磁作用从定子经过气隙传递到转子,这部分功率称为电磁功率; p_{Cu2} 为消耗在转子电阻上的铜耗; P_Ω 为电磁功率中消耗在附加电阻上的部分,称为机械功率;异步电机产生的机械功率并不能全部输出,因转子转动时,还存在轴承摩擦、风阻等损耗,这些损耗统称为机械损耗 p_m ;此外,由于电机运行过程中产生的高次谐波磁通和漏磁通,在电机的铁心、机座等金属部件产生损耗,这些损耗统称为附加损耗 p_Δ ;机械功率扣除机械损耗与附加损耗后剩余部分为异步电机的输出功率。

因此异步电机的输出功率计算为

$$\begin{cases} P_M = P_1 - p_{Cu1} - p_{Fe} \\ P_2 = (1-s)P_M - p_m - p_\Delta \end{cases} \quad (2)$$

式(2)中, $s=(n_1-n)/n_1$ 为转差率, n_1 为同步转速。

实际工况中,采用二表法测量电机三相功率,通过测量两相电流以及对应的线电压,来计算电机的输入功率,其计算公式为

$$\begin{aligned} U_{AB}I_A + U_{CB}I_C &= (U_A - U_B)I_A + (U_C - U_B)I_C = \\ U_A I_A + U_C I_C - U_B(I_A + I_C) &= \\ U_A I_A + U_B I_B + U_C I_C &= P_1 \end{aligned} \quad (3)$$

考虑到机构箱内电机均为小型异步电机,其附加损耗较小,计算时可忽略不计。再结合电机自身的空载特性曲线,见图2,可得到电机的铁耗系数与机械损耗。

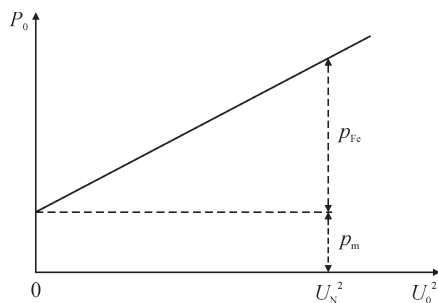


图2 电机空载特性曲线

Fig. 2 No-load characteristic curve of motor

同时,操作机构箱电机电源的电压变化范围为85%~110%额定电压,该范围内电机转速变化不大,因此可视转差率为额定转差率。在检测过程中,根据测量的电机工作电压、电流以及输入功率,结合电机的额定转差率、定子电阻、铁耗系数与机械损耗可得到电机的输出功率,输出功率为

$$P_2 = (1-s)(P_1 - 3I_1^2 R_1 - k_{Fe} U_1^2) - p_m \quad (4)$$

因此,提出采用输出功率检测方法,通过电机输入功率换算得到输出功率,在不同电压下重复性良好,能有效避免电机功率损耗影响。不同电压波动下,输入功率、输出功率检测结果见图3、4。

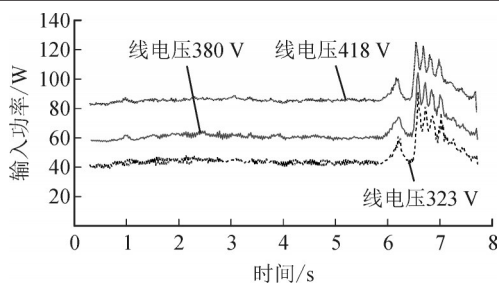


图3 输入功率检测结果

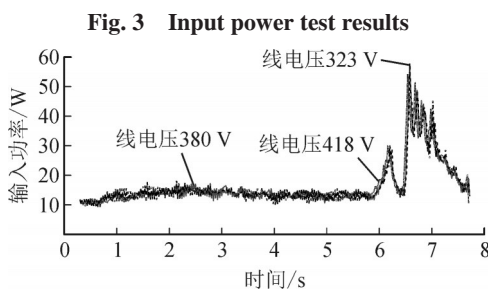


图4 输出功率检测结果

Fig. 4 Output power test results

2 检测结果分析

隔离开关在分合闸过程中,由于传动位置及受力的不同,会产生不同的波峰波谷,波峰波谷出现的时刻与隔离开关运动状态息息相关,因此,根据输出功率曲线波形,能有效判断隔离开关机械状态;根据曲线各段波峰波谷的位置与峰值,能有效判断缺陷部位。

经过多次实测,发现合闸输出功率波形波峰波谷特征量比分闸输出功率波形波峰波谷特征量更为明显,因此,建议在现场检测及故障判断时优先采用合闸输出功率波形。

目前,电力系统中常用110 kV及以上电压等级的隔离开关主要为4种:双柱水平旋转式、三柱水平旋转式、双柱水平伸缩式、单柱单臂垂直伸缩式。

2.1 双柱水平旋转式

常见的双柱水平旋转式隔离开关见图5的GW4型,其合闸输出功率典型波形见图6(a),对应的合闸过程见图6(b)。

图6(a)中其波形特征为:①触头触指啮合前,导电臂基本匀速旋转,主轴仅需克服摩擦阻力运动,力矩较小且平稳;②触头触指啮合过程中,触头先与外触指啮合,主轴还需克服触指阻力运动,力矩随之增大,曲线出现啮合阶段第1个波峰,该过程外触指形变较小,波峰幅值较小;③随后啮合过程中,触头与内触指啮合,内、外触指同时形变,力矩随之迅速大幅增大,曲线出现啮合阶段第2个波峰,该过程内、外触指形变较大,波峰幅值较大。

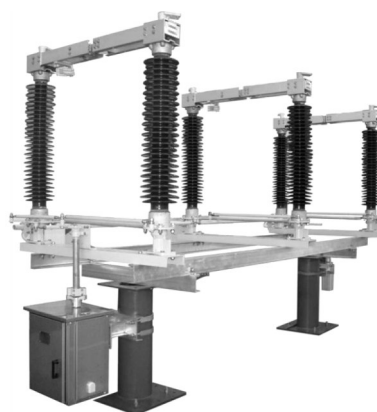
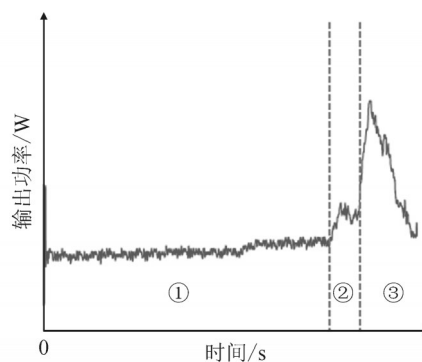
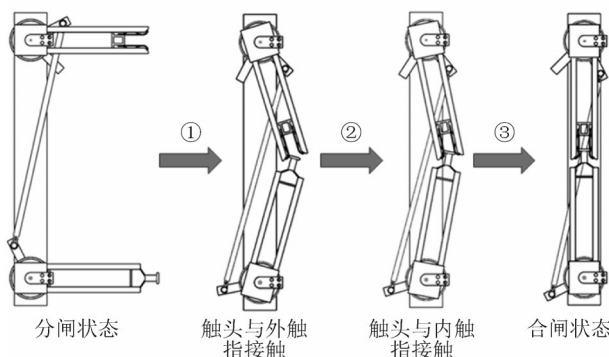


图5 GW4型隔离开关

Fig. 5 GW4 disconnector



(a) 输出功率曲线



(b) 合闸动作过程示意

图6 GW4型隔离开关合闸情况

Fig. 6 Closing condition of GW4 disconnector

2.2 三柱水平旋转式

常见的三柱水平旋转式隔离开关见图7的GW7型,其合闸输出功率典型波形见图8(a),对应的合闸过程见图8(b)。

图8(a)中其波形特征为:①触头触指啮合前,导电臂基本匀速旋转,主轴仅需克服摩擦阻力运动,力矩较小且平稳;②触头触指啮合过程中,导电管与定位件碰触后力矩突然增大,随后弹簧被逐渐压缩;整个啮合过程,弹簧先被压缩后逐渐释放,但触头触指夹紧力逐渐增大,阻力增大,因此啮合阶段力矩存在多个波峰。

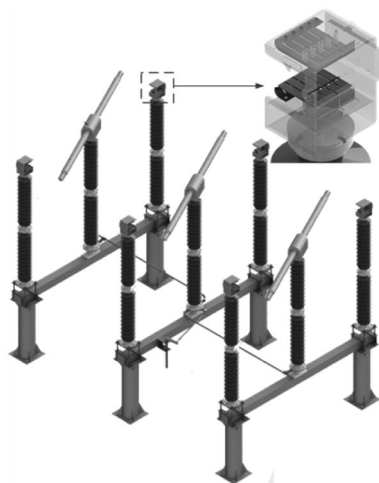


图7 GW7型隔离开关
Fig. 7 GW7 disconnector

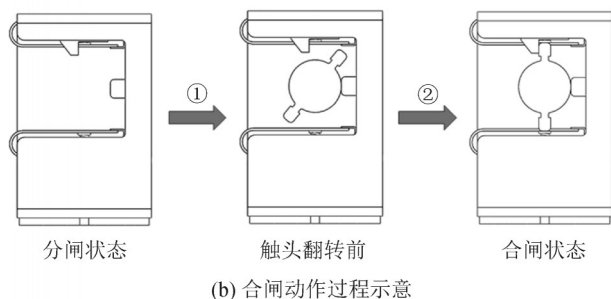
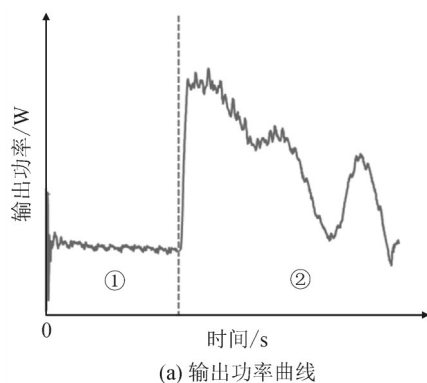


图8 GW7型隔离开关合闸情况

Fig. 8 Closing condition of GW7 disconnector

2.3 双柱水平伸缩式

常见的双柱水平伸缩式隔离开关为GW17型, 见图9, 其合闸输出功率典型波形见图10(a), 对应的合闸过程见图10(b)。

其波形特征为: ①触头触指啮合前, 导电臂逐渐展开, 由于重力变化与平衡弹簧弹力变化不平衡, 力矩呈现先逐渐增大后逐渐减小的趋势; ②触头触指啮合过程中, 在触头触指未接触前, 需要克服复位弹簧阻力运动, 力矩逐渐增大, 在触头触指接触后, 需要同时克服复位弹簧和夹紧弹簧阻力运动, 力矩快速增大, 整个啮合阶段仅存在一个典型波峰。

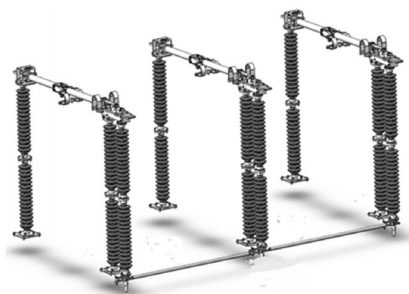


图9 GW17型隔离开关
Fig. 9 GW17 disconnector

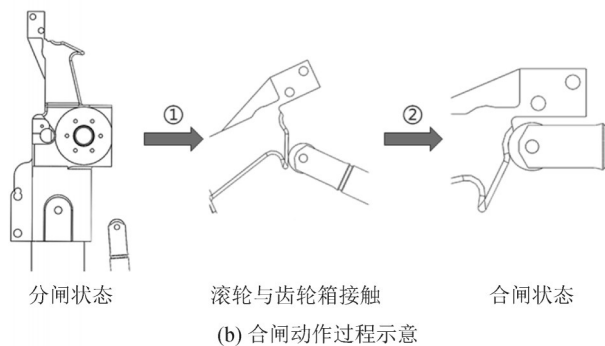
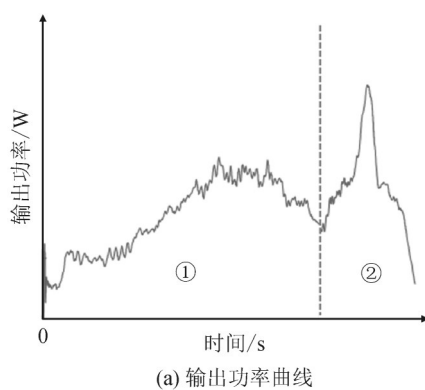


图10 GW17型隔离开关合闸情况

Fig. 10 Closing condition of GW17 disconnector

2.4 单柱单臂垂直伸缩式

常见的单柱单臂垂直伸缩式隔离开关为GW16型见图11, 其合闸输出功率典型波形见图12。由于单柱单臂垂直伸缩式的GW16型与双柱水平伸缩式的GW17型隔离开关结构类似, 其波形特征也基本一致。

3 现场应用

结合某新建变电站交接验收工作, 对24组220 kV敞开式隔离开关进行检测, 发现3组隔离开关(型号: GW7C-252D(W)/3150)存在调试不到位导致的卡涩情况。

2661 隔离开关输出功率曲线见图13(a)。在典

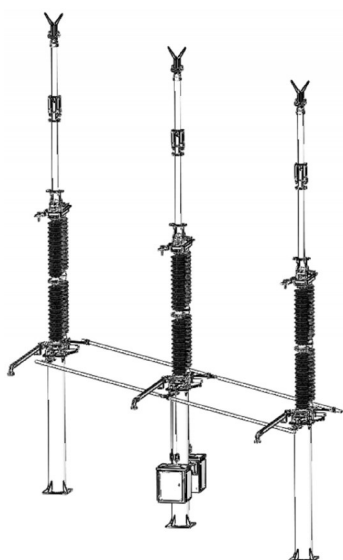


图11 GW16型隔离开关

Fig. 11 GW16 disconnecto

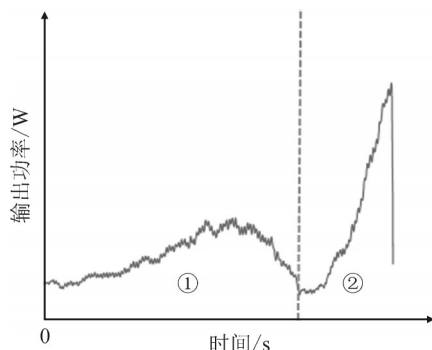


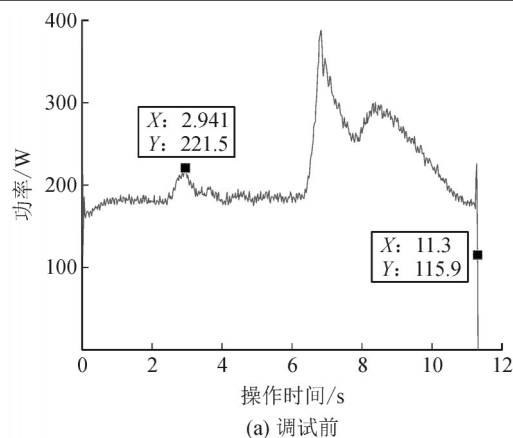
图12 GW16型隔离开关合闸输出功率曲线

Fig. 12 Closing output power curve of GW16 disconnecto

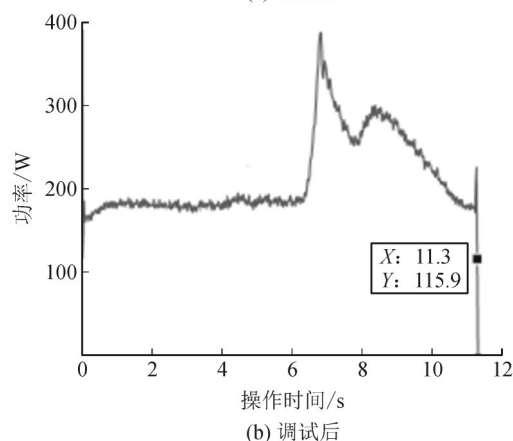
型波形图8(a)的第1阶段,出现一个异常波峰,初步判断导电臂水平旋转过程中,存在异常卡涩;经现场核查,主旋转绝缘子底座拉杆固定螺丝下端与地刀异常接触,地刀上对应位置存在明显划痕,见图13(c);检修调整后,机械状态正常,输出功率曲线见图13(b)。

2334 隔离开关输出功率曲线见图14(a)。在典型波形图8(a)为第一阶段,出现多个异常波峰,初步判断导电臂水平旋转过程中,存在异常卡涩;经现场核查,主旋转绝缘子底座闭锁盘与地刀闭锁轴承接触间隙过小,存在异常碰撞情况,见图14(c);检修调整后,机械状态正常,输出功率曲线见图14(b)。

2796 隔离开关输出功率曲线见图15中线1。在典型波形图8(a)的第2阶段,接近行程末端出现一个异常波峰;经现场核查,发现该隔离开关在过死点时有轻微异常响动,且其主拉杆长度略偏短,



(a) 调试前



(b) 调试后



(c) 异常划痕

图13 2661 隔离开关检测情况

Fig. 13 Detection of 2661 disconnecto

造成过死点时主轴需要较大的力矩;现场略微增加拉杆长度(调试相应螺母转动一圈)后,异常波峰消失,机械状态正常,输出功率曲线见图15中线2。

4 结论

1)文中提出了一种基于电机输出功率的隔离开关机械故障检测技术,并经现场验证了其有效性。

2)该方法可以用于隔离开关机械状态在线检测或传动时的带电检测,也可以用于隔离开关出厂试验、交接验收、检修后评估等质量把控。

3)后续通过智能化算法,结合输出功率曲线分段及各段波峰波谷的位置,可以实现隔离开关机械状态的自动判定及预警。

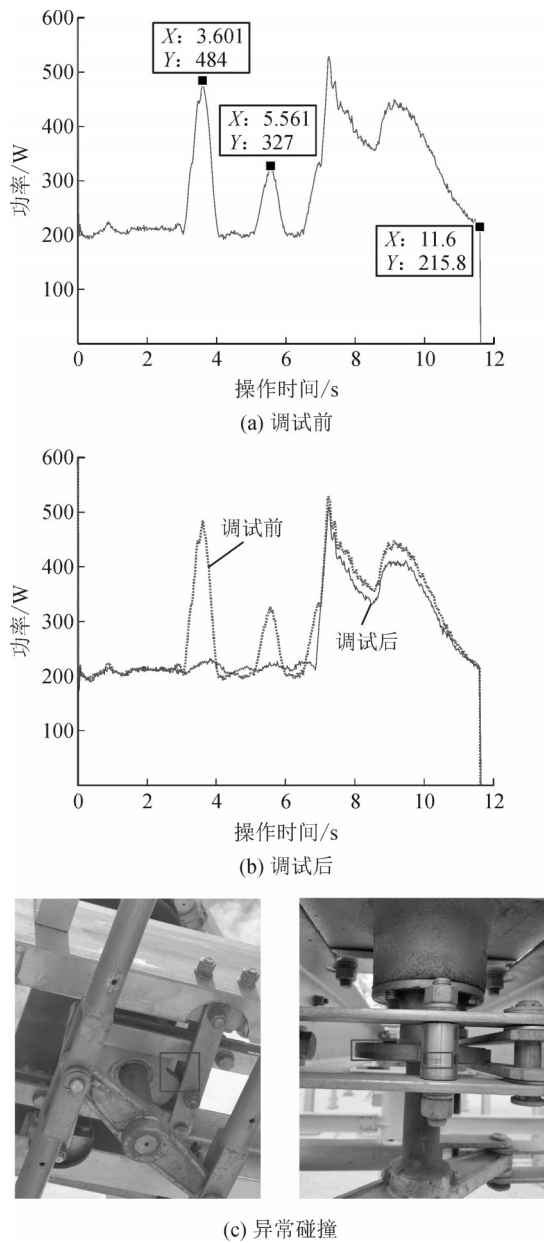


图 14 2334 隔离开关检测情况

Fig. 14 Detection of 2334 disconnector

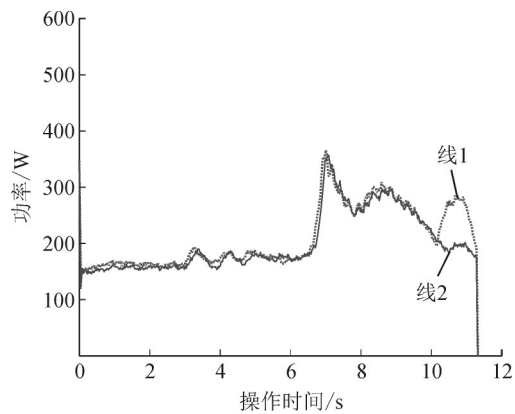


图 15 2796 隔离开关检测情况

Fig. 15 Detection of 2796 disconnector

参考文献:

[1] 苑 舜,崔文军. 高压隔离开关设计与改造[M]. 北京:中国电力出版社,2007.
YUAN Shun, CUI Wenjun. Design and modification of high voltage isolating switch[M]. Beijing: China Electric Power Press, 2007.

[2] 崔景春. 高压交流隔离开关和接地开关[M]. 北京:中国电力出版社,2016.
CUI Jingchun. High voltage AC disconnector and earthing switch[M]. Beijing: China Electric Power Press, 2016.

[3] 国网河北省电力公司. 高压隔离开关检修[M]. 北京:中国电力出版社,2015.
State Grid Hebei Electric Power Company. High voltage isolation switch overhaul[M]. Beijing: China Electric Power Press, 2015.

[4] 程 林,徐 惠,刘宇飞,等. 基于力矩—转角曲线的水平折臂式隔离开关机械状态检测方法[J]. 高压电器, 2020, 56(4): 192-198.
CHENG Lin, XU Hui, LIU Yufei, et al. Mechanical state detection method of horizontal folding arm disconnector based on torque-angle curve[J]. High Voltage Apparatus, 2020, 56(4): 192-198.

[5] 王 栋,王大方,吴剑敏,等. 隔离开关机械特性检测装置[J]. 电子技术应用, 2014(s1): 178-180.
WANG Dong, WANG Dafang, WU Jianmin, et al. Mechanical characteristic detection device of disconnector[J]. Application of Electronic Technique, 2014(s1): 178-180.

[6] 周录波,耿俊秋,王大方,等. GIS 设备中隔离开关负载特性测试研究[J]. 自动化与仪器仪表, 2020(4): 209-212.
ZHOU Lubo, GENG Junqiu, WANG Dafang, et al. Research on load characteristics test of isolator in GIS equipment[J]. Automation & Instrumentation, 2020(4): 209-212.

[7] 王 栋. 隔离开关智能测试装置的设计[D]. 上海:上海交通大学, 2014.
WANG Dong. Design of intelligent test device for disconnector[D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2014.

[8] 刘春来,周涛涛,马宏明,等. 基于力矩与转角检测的 GW4-126 型隔离开关典型机械故障诊断[J]. 高压电器, 2020, 56(2): 232-239.
LIU Chunlai, ZHOU Taotao, MA Hongming, et al. Typical mechanical fault diagnosis of GW4-126 disconnector based on torque and angle detection[J]. High Voltage Apparatus, 2020, 56(2): 232-239.

[9] 彭诗怡,刘 衍,周涛涛,等. 基于操作力矩的高压隔离开关机械缺陷智能诊断[J]. 电工技术学报, 2021, 36(7): 1356-1367.

- PENG Shiyi, LIU Yan, ZHOU Taotao, et al. Intelligent diagnosis technology of mechanical defects of high voltage disconnecter[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2021, 36(7): 1356-1367.
- [10] 李 喆, 扬 帆, 邓颖海. GW4-220 kV 高压隔离开关棒形支柱瓷绝缘子静力学特性研究及其优化[J]. 电磁避雷器, 2016(1): 1-6.
- LI Zhe, YANG Fan, DENG Yinghai. Static mechanical properties study and optimization of porcelain post insulator for GW4 - 220 kV high voltage disconnecter[J]. Insulators and Surge Arresters, 2016(1): 1-6.
- [11] 马志强, 赵艳涛, 张 垒, 等. GIS用550 kV/8 000 A大电流高压绝缘套管设计研究[J]. 电瓷避雷器, 2022(3): 201-208.
- MA Zhiqiang, ZHAO Yantao, ZHANG Lei, et al. Design and research of 550 kV/8 000 A large current and high voltage insulating bushing for GIS[J]. Insulators and Surge Arresters, 2022(3): 201-208.
- [12] 龚泽威一, 曹占国, 周 帅, 等. 基于过采样和随机森林的高压隔离开关发热故障诊断[J]. 电网与清洁能源, 2023, 39(11): 72-79.
- GONG Zewei, CAO Zhanguo, ZHOU Shuai, et al. The thermal fault detection of high voltage disconnectors based on oversampling and random forest[J]. Power System and Clean Energy, 2023, 39(11): 72-79.
- [13] 马宏明, 周涛涛, 彭诗怡, 等. 基于操作杆转角信号的隔离开关机械故障诊断技术研究[J]. 高压电器, 2018, 54(8): 33-39.
- MA Hongming, ZHOU Taotao, PENG Shiyi, et al. Research on mechanical fault diagnosis technology of disconnecter based on operation corner angle signal[J]. High Voltage Apparatus, 2018, 54(8): 33-39.
- [14] 吴旭涛, 赵晋飞, 马云龙, 等. 基于多频激励下振动响应的GIS机械缺陷诊断方法[J]. 电力电容器与无功补偿, 2022, 43(4): 108-115.
- WU Xutao, ZHAO Jinfei, MA Yunlong, et al. Mechanical defect diagnosis technology of GIS based on vibration response under multiple frequency excitation[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2022, 43(4): 108-115.
- [15] 白建伟, 于 力, 丛培军, 等. GIS内隔离开关机械故障检测方法研究[J]. 高压电器, 2022, 58(4): 137-144.
- BAI Jianwei, YU Li, CONG Peijun, et al. Mechanical fault detection method of disconnecter in GIS[J]. High Voltage Apparatus, 2022, 58(4): 137-144.
- [16] 司 维, 司洪孝. 220 kV GIS隔离开关机械特性的研究与改进[J]. 高压电器, 2018, 54(3): 243-250.
- SI Wei, SI Hongxiao. Research and improvement on mechanical characteristics of 220 kV GIS disconnecter[J]. High Voltage Apparatus, 2018, 54(3): 243-250.
- [17] 梁基重, 晋 涛, 牛 曙, 等. 基于EMDFFT特征提取的GIS机械缺陷诊断方法研究[J]. 电力科学与技术学报, 2023, 38(3): 216-223.
- LIANG Jichong, JIN Tao, NIU Shu, et al. Research on GIS mechanical defect diagnosis method based on EMDFFT feature extraction[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2023, 38(3): 216-223.
- [18] 刘子英, 张 靖, 邓芳明. 基于BP神经网络的高压隔离开关分合闸监测识别[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(5): 134-140.
- LIU Ziyang, ZHANG Jing, DENG Fangming. Monitoring and identification of state of opening or closing isolation switch based on BP neural network[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(5): 134-140.
- [19] 刘春来, 周涛涛, 马宏明, 等. 基于力矩与转角检测的GW4-126型隔离开关典型机械故障诊断[J]. 高压电器, 2020, 56(2): 232-239.
- LIU Chunlai, ZHOU Taotao, MA Hongming, et al. Typical mechanical fault diagnosis of GW4-126 disconnecter based on torque and angle detection[J]. High Voltage Apparatus, 2020, 56(2): 232-239.
- [20] 司江宽, 吐松江·卡日, 范 想, 等. 基于SO-PAA-GAF和AdaBoost集成学习的高压断路器故障诊断[J]. 电力系统保护与控制, 2024, 52(3): 152-160.
- SI Jiangkuan, TUSONGJIANG Kari, FAN Xiang, et al. Fault diagnosis of high-voltage circuit breaker based on SO-PAA - GAF and AdaBoost ensemble learning[J]. Power System Protection and Control, 2024, 52(3): 152-160.
- [21] 赵书涛, 李小双, 李大双, 等. 基于相空间重构与GSA-LVQ的有载调压变压器分接开关机械故障诊断[J]. 电测与仪表, 2023, 60(10): 136-141.
- ZHAO Shutao, LI Xiaoshuang, LI Dashuang, et al. Mechanical fault diagnosis of on-load voltage regulating tap-changer based on CEEMD-phase space reconstruction and GSA-LVQ[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2023, 60(10): 136-141.
- [22] QIU Zhibin, RUAN Jiangjun, HUANG Daochun, et al. Mechanical fault diagnosis of high voltage outdoor disconnecter based on motor current signal analysis[C]//International Conference on Power System Technology. Chengdu, China:

- IEEE, 2014: 1193-1198.
- [23] QIU Zhibin, RUAN Jiangjun, HUANG Daochun. Mechanical fault diagnosis of outdoor high-voltage disconnecter[J]. IEEJ Transactions on Electrical and Electronic Engineering, 2016, 11(5): 556-563.
- [24] 成林, 陶佳鑫, 吴涛, 等. 330 kV GIS 隔离开关操作产生的 VFTO 电磁骚扰特性研究[J]. 电网与清洁能源, 2023, 39(5): 11-19.
- CHENG Lin, TAO Jiaxin, WU Tao, et al. Research on VFTO electromagnetic disturbance characteristics of 330 kV GIS disconnecter operation[J]. Power System and Clean Energy, 2023, 39(5): 11-19.
- [25] 杜耀文, 谢静, 刘志坚, 等. 基于深度学习的高压隔离开关分合状态检测算法研究[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(19): 114-123.
- DU Yaowen, XIE Jing, LIU Zhijian, et al. A detection algorithm for opening and closing states of high-voltage isolation switches based on deep learning[J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(19): 114-123.
- [26] 邱志斌, 阮江军, 黄道春, 等. 高压隔离开关机械故障分析及诊断技术综述[J]. 高压电器, 2015, 51(8): 171-179.
- QIU Zhibin, RUAN Jiangjun, HUANG Daochun, et al. Mechanical faults analysis of high voltage disconnectors and review of diagnosis technology[J]. High Voltage Apparatus, 2015, 51(8): 171-179.
- [27] 阳瑞霖, 何葵东, 胡蝶, 等. 基于振动信号 EMD 分解与支持向量机的有载分接开关机械故障诊断[J]. 变压器, 2022, 59(7): 29-33.
- YANG Ruilin, HE Kuidong, HU Die, et al. Mechanical fault diagnosis of on-load tap-changer based on EMD decomposition of vibration signal and support vector machine[J]. Transformer, 2022, 59(7): 29-33.
- 马宏明(1987—), 男, 高级工程师, 硕士, 研究方向为高压开关设备状态评价(E-mail:ncepuming@126.com)。

(上接第 240 页)

- [27] 周波, 常晓青, 张华, 等. 计及剩磁、合闸电阻及选相合闸策略的励磁涌流仿真评估方法[J]. 四川电力技术, 2018, 41(6): 37-40.
- ZHOU Bo, CHANG Xiaoqing, ZHANG Hua, et al. Evaluation method for inrush current simulation considering residual flux, closing resistance and phase-controlled switching strategy[J]. Sichuan Electric Power Technology, 2018, 41(6): 37-40.
- [28] 李振兴, 胡聪, 朱益, 等. 基于采样序列整形的配电网线路保护防励磁涌流误动策略[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(21): 136-145.
- LI Zhenxing, HU Cong, ZHU Yi, et al. An anti-excitation inrush current maloperation strategy of line protection for a distribution network based on sampling sequence shaping[J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(21): 136-145.
- [29] 蔡欢, 袁旭峰, 熊炜, 等. 柔性互联配电网运行调度研究综述[J]. 智慧电力, 2022, 50(6): 92-99.
- CAI Huan, YUAN Xufeng, XIONG Wei, et al. Review on operation scheduling of flexible interconnected distribution network[J]. Smart Power, 2022, 50(6): 92-99.
- 李英(1970—), 女, 正高级工程师, 长期从事电力变压器研发及高端输变电装备相关基础科研工作。
- 李海涛(1984—), 男, 硕士, 正高级工程师, 长期从事智能变电站技术、选相控制及一次设备在线监测研究工作。
- 刘根根(1947—), 男, 高级工程师, 从事高压开关设计工作(E-mail:liugengen50@163.com)。