

基于极寒条件下电气设备运行监测技术的电力系统在线分析

杨 铎¹, 李 玉², 郭 袅³, 张 健³, 郑 君³

(1. 国网黑龙江省电力有限公司, 哈尔滨 150090; 2. 沈阳嘉越电力科技有限公司, 沈阳 110000;
3. 国网黑龙江电力科学技术研究院, 哈尔滨 150030)

摘要: 提出了电力系统在线分析技术对站内设备的应用改进; 设计了极寒条件下的电气设备运行实验流程; 同时设计了以智能化数据采集监测系统作为基础、以极寒条件下运行实验结果作为依据的站内设备在线分析模块技术方案, 并以此为依据改进了在线分析系统; 通过实际运行例子验证了可行性。

关键词: 高压电气设备运行监测; 电力系统在线分析; 极寒条件下运行监测; 数据采集系统

On-line analysis of power system based on operation monitoring technology of electrical equipment in extremely cold conditions

YANG Duo¹, LI Yu², GUO Niao³, ZHANG Jian³, ZHENG Jun³

(1. State Grid Heilongjiang Electric Power Company Limited, Harbin 150090, China; 2. Shenyang Jiayue Electric Power Technology Company Limited, Shenyang 110000, China; 3. Heilongjiang Electric Power Research Institute, Harbin 150030, China)

Abstract: The improved application of the online analysis technology of the electrical power system to the station equipment is put forward, the experimental procedure for the operation of the electrical equipment in extremely cold conditions based on the intelligent substation technology is designed and the scheme for the online analysis module technology applied to the station equipment based on the system for monitoring the data of the intelligent substation and on experimental results of the operation in extremely cold conditions is designed. After improving online analysis system; the feasibility is verified by an actual operation example.

Key word: operational monitoring of tation equipment; online analysis technology; electrical equipment in extremely cold conditions; data analysis

0 引言

随着电气技术的不断发展, 智能化运行不断普及, 对调度运行和分析工作提出了更高的要求, 电气设备运行状态的监测和基于在线监测数据的故障分析也作为智能化运行的一部分被提出并大规模应用^[1-2]。目前针对电网的在线数据监测

和故障分析技术已经趋于成熟, 针对不同电网运行方式也都有了对应的监测分析技术^[3-4], 对于大电网运行中的风险预警、安全评估和风险控制等也都有了应对实现措施^[5-7]。但对于电气设备的运行参数和运行效果分析仍显不足。尤其是低温极寒环境下, 电气设备的机械特性和电气特性都会

发生明显变化。在全球能源互联网“一极一道”的运行体系下,电网在极寒条件下能否保持正常运行是支撑整体网架正常运行的重点,因为环境温度差异引发的运行参数变化也会更为频繁^[8]。传统的电力系统分析技术往往忽略温度因素,导致对故障产生原因和故障类型的分析存在欠缺。

本文对智能变电站运行监测采集系统、调度在线监测和故障分析系统以及在极寒条件下的电气设备运行情况作了大量的运行实验和数据分析,将这三个领域的研究成果相结合,提出利用在线实时采集系统的监测数据作为基础,利用实验得出的高压电气设备在极寒条件下机械特性和电气特性的变化规律作为依据,对电力系统在线监测和故障分析系统进行改进,以实现针对极寒条件下特有运行特点的电气设备运行情况的在线监测和故障分析。

1 设备运行监测数据采集

由于电气设备在运行过程中受到环境温度等外界因素的影响会产生机械特性和电气特性的变化,尤其是在高纬度高寒地区,电气设备在极寒条件下运行特性会发生较大变化,严重时会影响开断动作。因此设备运行情况的监测是智能化运行的主要任务之一。当前变电站多采用智能变电站模块化建设,其中设备监测模块作为变电站一体化监控系统的一个应用功能,根据设备运行情况,对断路器、隔离开关等站内设备的运行参数进行监测并获取运行温度、回路电阻等信息,分析其分合闸动作时间及动作受阻情况,并通过设备在线监测与分析上传。此模块已在多个电网开始试点建设,基本可保障监测数据准确并具有实时性。此模块可为极寒条件下设备运行监测提供数据支撑。

2 电力系统在线分析系统

电网整体运行情况及针对可能发生的故障情况主要通过电力系统在线分析得以实现^[9]。现有的在线分析主要针对线路短路接地、断线以及电厂、变电站停机等情况进行分析,所需的监

测数据主要针对输电线路潮流、变压器负载率、电压和电流等运行参数^[10]。虽然可以模拟电力系统运行中的线路故障,但对于站内高压电气设备的运行情况及可能导致的故障情况考虑严重不足,站内设备运行工况发生变化引起的故障往往被忽略。实际运行中,由于环境引起的机械特性和电气特性的变化往往会造成变电站内高压电气设备运行开关动作时间延迟或开断动作受阻等现象,严重影响倒闸操作和设备检修投运等工作的进行。

高压电气设备在运行中因环境温度等因素会产生运行状态的变化,也会导致设备灵敏度出现变化,同时会导致故障的切除时间发生变化,因此对故障下的暂态稳定产生影响。图1~图4为针对电网中某一节点发生220 kV线路故障和母线故障时,不同故障切除时间下母线电压变化和功角变化曲线。故障切除时间分别选取为0 s、0.1 s、0.101 s、0.105 s、0.11 s和0.111 s,电压数据为标么值。

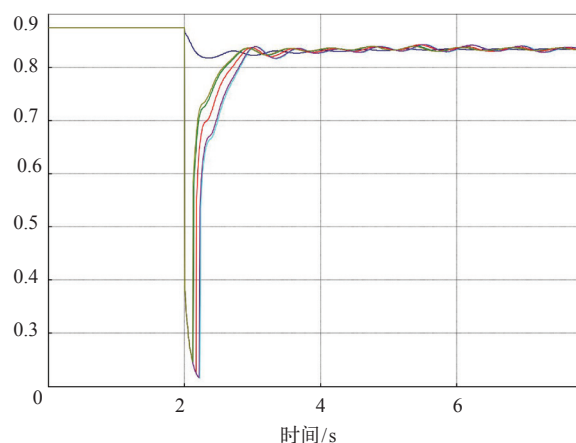


图1 某220 kV线路三相接地后近端三相断线故障情况下不同故障切除时间对侧220 kV母线电压波动情况

Fig.1 Voltage fluctuation of 220 kV bus on opposite side under near end three-phase disconnection fault after three-phase grounding of a 220 kV line at different fault clearance time

从图中可以看出,故障切除时间仅相差1 ms的情况下,电压和功角曲线就存在明显差别,对电网运行稳定性影响差异也很明显。目前的电力系统在线分析在考虑开关动作时间和动作延迟时往往仅根据常规故障处理情况对故障切除时间进行手工置数^[10]。实际运行中设备在环境因素影响下

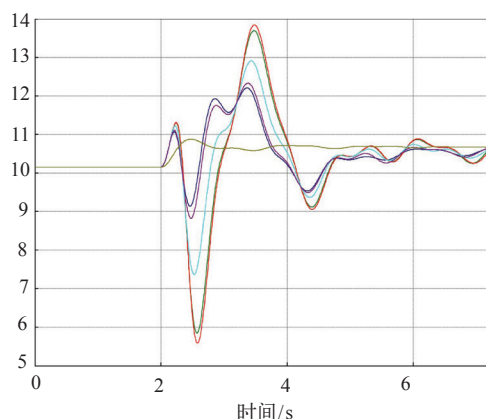


图2 某220 kV线路三相接地后近端三相断线故障情况下不同故障切除时间系统内两电厂发电机功角特性曲线变化

Fig.2 Changes of power angle characteristic curves of generators in two power plants system under near-end three-phase disconnection fault after three-phase grounding of a 220 kV line at different fault clearance time

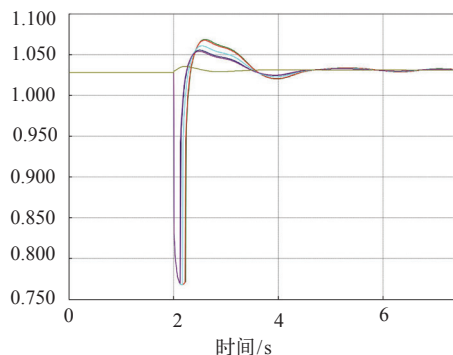


图3 某220 kV母线三相接地短路故障下母线不同切除时间下220 kV出线对侧母线电压波动情况

Fig.3 Voltage fluctuation of opposite bus of 220 kV outgoing line under a 220 kV bus three-phase grounding short-circuit fault at different bus clearance times

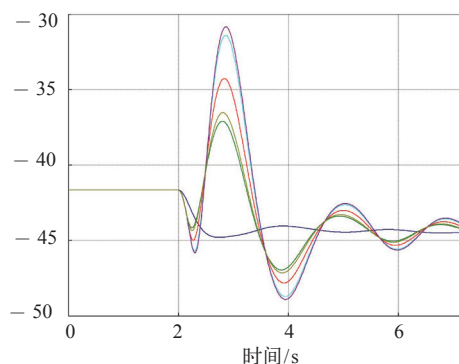


图4 某220 kV母线三相接地短路故障下母线不同切除时间系统内发电厂发电机功角特性曲线变化

Fig.4 Changes of power angle characteristic curves of generators in two power plants system under a 220 kV bus three-phase grounding short-circuit fault at different bus clearance times

发生灵敏度变化时,可能导致开关动作时间存在延迟,故障切除可能无法按照常规时间完成。因此在线分析设定的故障情况下的运行状况与实际会存在不符,无法反映实时运行情况,导致在线分析失去意义。因此对于高压电气设备的运行情况也需要进行相应的实时分析,能否实现高压电气设备运行情况的准确、实时和可靠的监控及数据获取,成为了能够实现高压电气设备在线运行分析的基础。

在设备监测模块作为实时数据获取源的前提下,可以满足高压电气设备监测数据准确、实时和可靠的要求。在此基础上对系统进行合理化分析改进,即可进行变电站内高压电气设备在线分析。

3 基于智能化数据采集系统的极寒条件下电气设备运行监测

3.1 实验背景和环境

本节选取高压交流SF₆断路器和隔离开关作为分析对象,依据实验数据对其在极寒条件下的机械特性变化作出规律性总结,并作为实时分析依据。

选用一年内5个不同温度的代表日进行分别实验,利用温度监测仪、回路电阻测试仪和动特性监测仪等多个高准确度数据采集设备对不同环境温度下的电气设备运行机械特性进行监测分析,在环境温度不变的情况下以各类设备的各项参数作为监测目标。包括动作时间、开关分合闸速度、触指压力和破冰能力等机械特性参数和线圈电阻、操作电压、保护信号转换速率和工频耐压情况等电气特性参数,每项参数进行多次测试并取加权平均数值作为最终测试结果。由于篇幅原因,本节仅选取断路器和隔离开关两种设备对相关参数监测结果进行分析。

实验环境设置在某高纬度寒冷地区220 kV变电站;1月中旬,最低运行温度为-40℃。

3.2 高压SF₆断路器运行参数监测

3.2.1 实验原则

本节对高压SF₆断路器的开断时间进行监测,

根据温度测试和控制选取5个保持不变的运行温度,利用动特性监测仪和回路电阻测试仪等仪器对瓷柱式和罐式两种高压SF₆断路器进行多次分合闸实验监测,并对多次测试所得结果进行加权平均,计算得出整体变化规律。

3.2.2 瓷柱式断路器运行监测

断路器合闸及分闸速度随温度降低而变慢,随着环境温度的降低,瓷柱式断路器动作机构内液压油活性发生变化,油性液体流动性变差,会增加开关动作阻力,因此断路器分合闸速度会降低,直接影响重合闸工作情况和故障电流的切断能力,对故障的切除动作有极大影响^[11]。本节拟对断路器动作性能进行监测,并考虑其随温度变化的规律性进行在线分析。本次实验选取的瓷柱式断路器运行额定参数为: $U_0=252\text{ kV}$; $I_0=4\text{ kA}$; $f=50\text{ Hz}$; $I=50\text{ kA}$; $I'=125\text{ kA}$ 。其中 U_0 、 I_0 和 f 分别为额定电压、额定电流和额定频率, I 、 I' 为额定短路开断及关合电流。实验设备按照厂家定义标准规定其正常运行分闸时间不大于30 ms,合闸时间不大于90 ms。

主要测量用实验设备清单如表1所示。

表1 瓷柱式断路器监测实验设备清单

Tab.1 List of monitoring experimental equipment for ceramic column circuit breakers

名称	单位	数量
回路电阻测试仪	台	1
断路器动特性测试仪	台	1
工频谐振耐受电压装置	套	1

随温度变化监测得到的运行情况数据如表2所示。

表2 瓷柱式断路器运行参数监测结果

Tab.2 Monitoring results of operating parameters of ceramic column circuit breaker

运行温度/ °C	合闸速度/ (m/s)	分闸速度/ (m/s)	合闸时间/ ms	分闸时间/ ms	线圈电阻/ Ω	动作电压/ V
10	3.68	7.42	68.5	18.0	141	219
0	3.66	7.39	70.2	18.2	135	219
-10	3.64	7.29	71.9	18.3	128	219
-20	3.57	7.19	73.0	18.5	122	219
-30	3.48	7.11	76.5	18.6	115	219
-40	3.34	7.02	77.4	18.8	112	219

从表2中数据可以看出,瓷柱式断路器分合闸速度随温度降低会持续降低,且温度越降低越快,所需分合闸时间越长。同时线圈电阻也随温度降低而持续降低。所测得数据均在正常工作范围内,但具体动作时间变化明显。由于篇幅原因,仅列出10℃和-20℃下的分合闸机械特性波形,如图5~图8所示。

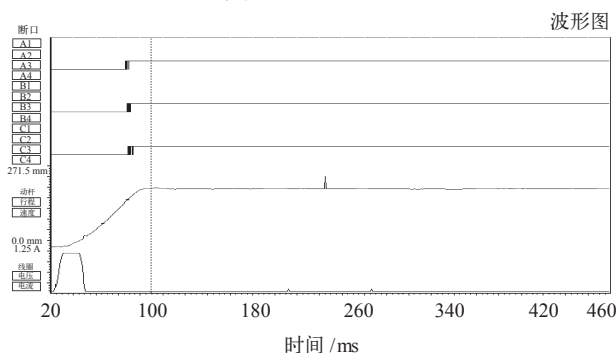


图5 10℃时瓷柱断路器合闸机械特性波形

Fig.5 Mechanical characteristic waveform of ceramic column circuit breaker closing at 10 °C

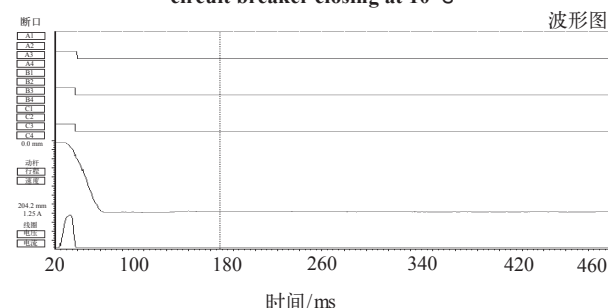


图6 10℃时瓷柱断路器分闸机械特性波形

Fig.6 Mechanical characteristic waveform of ceramic column circuit breaker at 10 °C

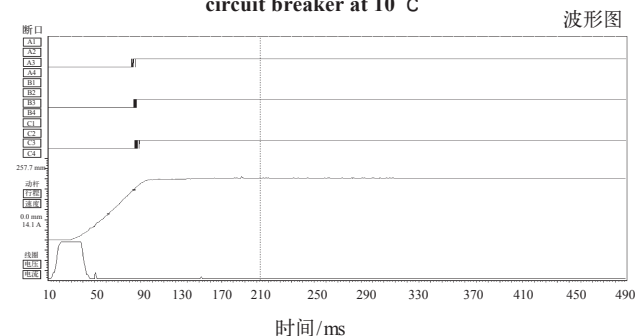


图7 -20℃时瓷柱断路器合闸机械特性波形

Fig.7 Mechanical characteristic waveform of ceramic column circuit breaker closing at -20 °C

3.2.3 罐式断路器运行参数监测

罐式断路器触头密闭在SF₆气体容器中,在低

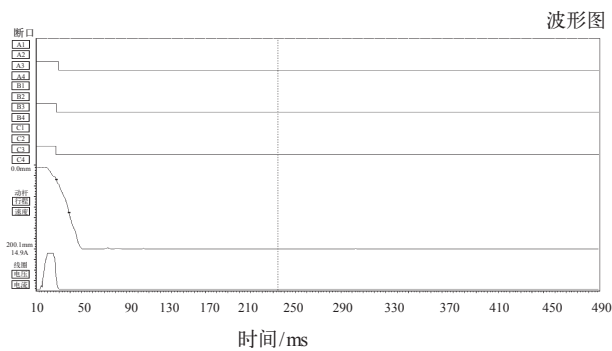


图8 -20 °C时瓷柱断路器分闸机械特性波形
Fig.8 Mechanical characteristic waveform of ceramic column circuit breaker at -20 °C

温下可以使用加热装置对其进行加热，以保障运行温度并防止气体液化。本次实验过程中同时对SF₆气体压力进行监测，在实验过程中气体压力一直处于正常状态，断路器运行处于正常工作状态下无气体液化现象。本次实验选取的罐式断路器运行额定参数为： $U_0=252\text{ kV}$ ； $I_0=2.5\text{ kA}$ ； $f=50\text{ Hz}$ ； $I=50\text{ kA}$ 。实验设备按照厂家定义标准规定其正常运行情况下分闸时间在 $23\pm7\text{ s}$ 范围内，合闸时间不大于 100 ms ，主要测量用实验设备清单如表3所示。

表3 罐式断路器监测实验设备清单
Tab.3 List of tank circuit breaker monitoring experimental equipment

名称	单位	数量
回路电阻测试仪	台	1
断路器动特性测试仪	台	1
工频谐振耐压装置	套	1

随温度变化监测得到的运行情况数据如表4所示。

表4 罐式断路器运行参数监测结果
Tab.4 Monitoring results of operating parameters of tank circuit breakers

运行温度 /°C	合闸速度 /(m/s)	分闸速度 /(m/s)	合闸时间 /ms	分闸时间 /ms	线圈电阻 /Ω	动作电压 /V
10	4.62	8.82	88.2	25.1	158	220
0	4.57	8.76	88.9	25.3	154	220
-10	4.55	8.61	89.5	25.6	151	220
-20	4.52	8.52	89.8	25.8	149	220
-30	4.46	8.40	91.4	25.9	145	220
-40	4.31	8.33	92.2	26.0	140	220

从表4中可以看出，罐式断路器随温度降低，合闸速度会持续降低，合闸时间持续变长，且温度越低变化越明显。分闸速度随温度降低也会持续降低，在 $-10\sim-20\text{ °C}$ 区间变化最为明显。线圈电阻随温度降低持续降低。对比发现罐式断路器在温度下降时分合闸动作时间变化幅度较瓷柱式断路器更小。

3.3 隔离开关运行情况监测

3.3.1 极寒条件下隔离开关运行参数监测

隔离开关在极寒条件下经常会发生机械性故障，如绝缘子断裂、分合闸动作失灵等，其原因主要是材料活性发生变化所致，长期处于低温环境下，绝缘子、法兰和轴承等部件均会发生老化或疲劳，严重影响运行效果，增加故障概率^[12]。同时，由于覆冰等外界环境因素导致的触头动作不到位、开关切换受阻或动作强度过大等问题大量存在。尤其是覆冰导致的触头动作失效，可能会造成故障切除或检修操作时由于开关动作不到位而无法顺利切除故障，引起带负荷拉刀开关等电力系统“五防”事故发生，严重威胁电力系统安全运行^[13]。本节利用智能化数据监测模块对某型号隔离开关的开断时间进行监测，根据温度测试和控制，在5个恒定运行温度下利用动特性监测仪和回路电阻测试仪等对隔离开关进行多次分合闸实验监测，并对多次测试所得结果进行加权平均计算，最后得出整体变化规律。实验采用隔离开关技术参数为： $U_0=252\text{ kV}$ ； $I_0=2.5\text{ kA}$ ； $I^*=50\text{ kA}$ 。其中， I^* 为额定短时耐受电流。实验所用监测设备清单如表5所示。

表5 隔离开关监测实验设备清单
Tab.5 List of isolating switch monitoring experimental equipment

名称	单位	数量
回路电阻测试仪	台	1
断路器动特性测试仪	台	1
工频谐振耐压装置	套	1

随温度变化监测得到的运行情况数据如表6所示。

表6 隔离开关运行参数监测结果

Tab.6 Monitoring results of operating parameters of isolating switch

运行温度/℃	合闸时间/s			分闸时间/s			线圈电阻/Ω		
相别	A	B	C	A	B	C	A	B	C
10	8.4	8.4	8.5	8.3	8.3	8.3	75.28	74.16	62.81
0	8.4	8.4	8.5	8.3	8.3	8.3	70.58	68.22	62.47
-10	8.4	8.5	8.5	8.3	8.3	8.3	69.01	66.15	62.01
-20	8.4	8.5	8.5	8.3	8.3	8.3	67.02	64.08	61.85
-30	8.5	8.5	8.6	8.4	8.5	8.5	65.44	62.18	61.72
-40	8.6	8.6	8.6	8.6	8.6	8.6	65.12	60.88	61.42

从表6中可以看出,随着温度降低,隔离开关分合闸时间会有所增加,但极为缓慢,而线圈电阻会持续降低(动作触指压力也会增大),皆为材质活性变化引起。

3.3.2 隔离开关破冰能力监测

如前文所述,隔离开关因覆冰造成动作困难导致无法顺利切除是极寒条件下发生严重停电事故的主要原因之一,但覆冰厚度监测目前尚无成熟技术可实现,因此需要通过设备本身运行参数对覆冰情况进行监测分析。

当覆冰厚度达到一定程度时,隔离开关触指压力会明显增大,覆冰造成动触头与静触头动作阻力增大是覆冰造成故障的原因,因此可以采取对触指压力的监测来估算其覆冰情况和触头动作情况。不同温度下固定覆冰厚度的A相平均触指压力如表7所示,测量数据为多次测量后的加权平均值。

表7 隔离开关覆冰情况下A相触指压力监测结果

Tab.7 Monitoring results of A - phase contact finger pressure under icing condition of isolating switch

覆冰厚度/mm	触指压力/N		
温度	-10℃	-20℃	-30℃
0	551	572	589
5	574	593	602
10	591	617	633
15	612	639	651
20	637	660	682

根据厂家定义标准规定,表7中监测触指压力

上下浮动5 N时均属同样覆冰厚度范围下正常触指压力,通过不同温度下的触指压力监测可得出覆冰情况,并判断开断能否顺利进行。

实际运行中,只通过以上流程可以得出极寒条件下电气设备运行参数变化规律,采用数据采集模块系统对电气设备进行运行情况监控并上传至在线分析端,即可进行极寒条件下的高压电气设备在线分析,从而得出高压电气设备在监测环境下的动作时间和相关运行参数,为在线故障分析提供更有参考性的数据支撑。

4 智能化设备运行情况在线监控及分析系统技术方案

设备运行监控系统应具备信息处理的功能并配置相应模块,其应用技术方案如下。

1) 信息获取。通过温度监测仪、回路电阻测试仪等获取站内设备运行参数。其中温度、回路电阻等信息主要用于分析其开断时间;动特性监测情况主要用于分析动作受阻情况。

2) 信息处理及上传。动特性监测信息经I区监控服务器统一采集处理;其他信息通过II区综合应用服务器采集处理;数据经数据通信网关上传至调度在线分析端。

3) 数据分析。数据经信息处理模块分析,根据机械特性与电气特性分析程序得出断路器、隔离开关动作时间和受阻情况。

4) 信息应用。上传及分析数据皆在调度设备在线监视与分析界面显示,并与网络报文记录分析装置整合,实现实时监测和分析。

5) 根据实时监测结果,将设备动作情况录入在线分析系统,实现在线分析参数实时更新固化,以保障在线分析时故障动作情况准确性。

添加了温度和动特性监测模块的电力系统在线分析界面如图9所示。

选取C站作为故障点,220 kV线路侧2%距离处发生三相永久接地故障,按照保护装置正常运行情况,故障切除时间为0.125 s,考虑温度延迟,故障切除时间自动设定为0.133 s,故障后其母线电压和系统功角曲线如图10、图11所示。

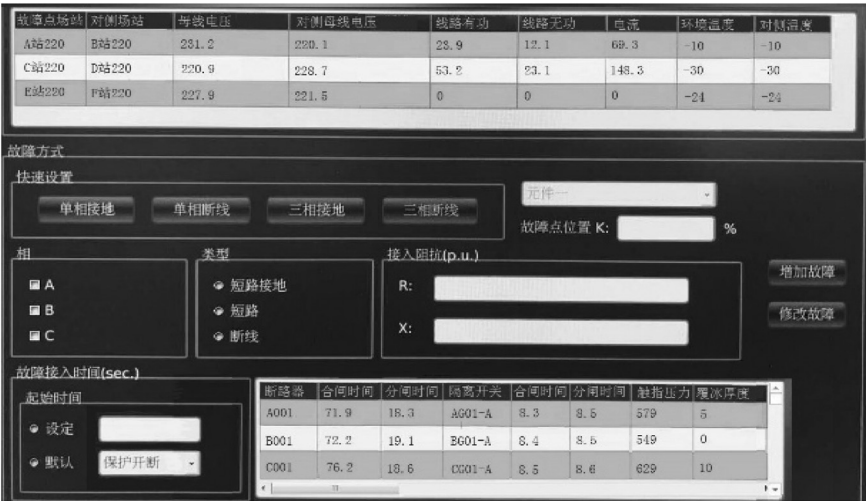


图9 动特性监测下的电力系统在线分析界面

Fig.9 Power system on-line analysis interface under dynamic characteristics monitoring

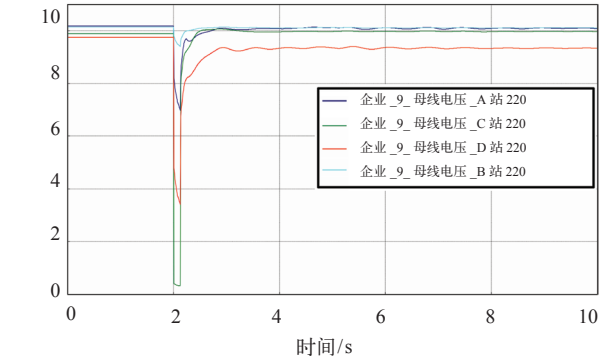


图10 添加温度和动特性监测模块后的电力系统在线分析母线电压波动曲线

Fig.10 Power system on-line analysis of bus voltage fluctuation curve after adding temperature and dynamic characteristics monitoring module

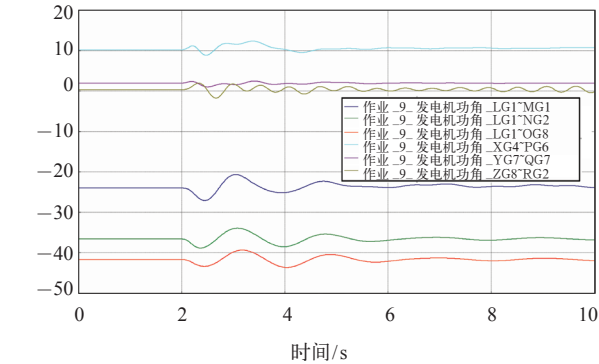


图11 添加温度和动特性监测模块后的电力系统在线分析系统功角波动曲线

Fig. 11 On-line analysis of power angle fluctuation curve in power system after adding temperature and dynamic characteristics monitoring module

从图10、图11中可以看出,改进后的电力系统在线分析系统可以实时地反映出故障情况下的系统暂态稳定情况,并且使分析结果更具有接近实际运行情况的参考价值。

5 结束语

本文设计了基于智能化变电站的数据采集系统,对极寒条件下的变电设备运行情况进行多次实验,以实验结果作为参考依据,利用智能化变电站的数据监测系统对断路器、隔离开关等站内设备进行数据采集,并通过智能化一体化系统上传数据至在线分析系统,对监测数据进行固化和分析,以此为基础进行在线故障情况模拟分析的站内设备在线分析流程,对变电站安全稳定运行具有一定的保障作用。

参考文献

[1] GALVAN F, WELLS C H. Detecting and managing the electrical island created in the aftermath of Hurricane Gustav using phasor measurement units (PMUs) [C]. 2010 IEEE T&D Conference and Expo. New Orleans, Louisiana, USA: IEEE, 2010.

[2] EJEBE G C, JING C, WAIGHT J G, et al. On-line dynamic security assessment in an EMS[J]. IEEE Computer Application in Power, 1998, 11(1):

- 43-47.
- [3] 国家电力调度控制中心. 大电网在线分析理论及应用[M]. 北京: 中国电力出版社, 2014.
- [4] PRABHA K. 电力系统稳定与控制[M]. 北京: 中国电力出版社, 2012.
- [5] 郑超, 侯俊贤, 严剑峰, 等. 在线动态安全评估与预警系统的功能设计与实现[J]. 电网技术, 2010, 34(3): 55-60.
- ZHENG Chao, HOU Junxian, YAN Jianfeng, et al. Functional design and implementation of online dynamic security assessment and warning system [J]. Power Grid Technology, 2010, 34 (3): 55-60.
- [6] 汤涌, 王英涛, 田芳, 等. 大电网安全分析、预警及控制系统的研发[J]. 电网技术, 2012, 36(7): 1-11.
- TANG Yong, WANG Yingtao, TIAN Fang, et al. Research and development of security analysis, early warning and control system for large power grid [J]. Power Grid Technology, 2012, 36 (7): 1-11.
- [7] 吴文传, 张伯明, 孙宏斌. 在线安全预警和决策支持系统的软件构架与实现[J]. 电力系统自动化, 2007, 31(12): 23-29.
- WU Wenchuan, ZHANG Boming, SUN Hongbin. Software architecture and implementation of online security early warning and decision support system [J]. Power system automation, 2007, 31(12): 23-29.
- [8] 谢国辉, 李琼慧. 全球能源互联网技术创新重点领域及关键技术[J]. 中国电力, 2016, 49(3): 18-23.
- XIE Guohui, LI Qionghui. Key areas and key technologies of global energy internet technological innovation [J]. China Electric Power, 2016, 49 (3): 18-23.
- [9] 赵选宗, 雷鸣, 李靖, 等. 电力系统在线安全稳定分析技术研究[J]. 山东电力技术, 2014, 41(5): 6-12.
- ZHAO Xuanzong, LEI Ming, LI Jing, et al. On-line security and stability analysis technology of power system [J]. Shandong Power Technology, 2014, 41 (5): 6-12.
- [10] 孙树鸣, 谢昶, 吕颖, 等. 电力系统在线安全稳定分析应用模式 [J]. 电网技术, 2015, 39(10): 2875-2881.
- SUN Shuming, XIE Chang, LV Ying, et al. Application mode of on-line security and stability analysis of power system [J]. Power grid technology, 2015, 39 (10): 2875-2881.
- [11] 阮少军, 费逸伟, 吴楠, 等. 润滑油低温流动性的研究[J]. 化工时刊, 2017, 31(4): 39-43.
- RUAN Shaojun, FEI Yiwei, WU Nan, et al. Study on low temperature fluidity of lubricants [J]. Chemical Journal, 2017, 31 (4): 39-43.
- [12] 郝富杰. 概述金属疲劳产生的原因及影响因素[J]. 山西建筑, 2011, 37(11): 51-52.
- HAO Fujie. Summarize the causes and influencing factors of metal fatigue [J]. Shanxi Architecture, 2011, 37 (11): 51-52.
- [13] 张鸿, 张绍志. 冰雪灾害期间确保发电设备稳定运行技术管理经验 [J]. 贵州电力技术, 2008(增刊1): 86-87.
- ZHANG Hong, ZHANG Shaozhi. Technical management experience in ensuring stable operation of power generation equipment during ice and snow disasters [J]. Guizhou Electric Power Technology, 2008(S1): 86-87.

作者简介



杨铎

杨铎(1987-), 男, 硕士研究生, 工程师, 主要从事电力系统规划、电力系统分析和电动汽车等研究工作。

(收稿日期: 2018-09-19) **EA**