

DOI:10.13296/j.1001-1609.hva.2020.05.021

低温环境下电子式电流互感器激光供电情况的分析与研究

王传川¹, 白世军^{1,2}, 李毅¹, 石楠¹, 陈凯¹, 马亮¹, 贾乐¹

(1. 西安西电高压开关有限责任公司, 西安 710077; 2. 西安交通大学电气工程学院, 西安 710049)

摘要: 激光供电是有源型电子式电流互感器的关键器件之一, 它的性能直接影响电子式互感器的性能。激光供电系统受环境条件影响较大, 特别是低温下有可能使电子式互感器不能正常工作, 该文介绍了激光供电系统在不同温度下的试验结果, 根据实验结果采取的改善激光供电系统性能的温度补偿方法, 并在实际工程中得到了应用。该文对有源式电子式互感器的设计人员和工程使用人员都有一定的参考价值。

关键词: 电子式电流互感器; 激光供电; 采集器; 合并单元

Analysis and Research on Laser Power Supply Condition of Electronic Current Transformer Under Low Temperature Environment

WANG Chuanchuan¹, BAI Shijun^{1,2}, LI Yi¹, SHI Nan¹, CHEN Kai¹, MA Liang¹, JIA Le¹

(1. Xi'an XD High Voltage Apparatus Co., Ltd., Xi'an 710077, China; 2. School of Electrical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: Laser power supply is one of the key components of active electronic current transformer, its performance directly affects the performance of electronic current transformer. The laser power supply system is greatly affected by the environmental conditions, especially the electronic transformer may not work normally at low temperature. This paper introduces the experimental results of the laser power supply system at different temperatures. According to the experimental results, the temperature compensation method is adopted to improve the performance of the laser power supply system, and it has been applied in practical projects. This paper has a certain reference value for the designers and engineering users of active electronic transformer.

Key words: electronic current transformer; laser power; sampling unit; merging unit

0 引言

智能隔离断路器实现了隔离开关、断路器、互感器的集成, 不但占地面积小、投资少, 而且具有可靠性高、维护量少等特点, 逐渐在智能化变电站中得到使用。电子式互感器具有体积小、重量轻、无磁饱和、无二次开路、可方便地与一次高压开关设备组合安装, 有效提高了设备集成度和可靠性, 减少用地、安装运输方便等优点^[1-5], 具有广泛的应用市场前景。

随着智能变电站建设不断地推进, 集成有源电

子式电流互感器的智能隔离断路器(DCB)应用越来越多^[6-11], 由于有源电子式电流互感器的采集器位于高压侧, 考虑绝缘要求, 一般在线路无电流或小电流下, 通过低压侧激光供能来确保采集器的正常工作, 电流达到阈值时, 通过高压侧的取能线圈供电, 但是激光供电容易受外界环境影响, 在工程现场经常出现低温情况下, 电流数据采集异常的现象, 从而影响变电站的正常工作, 所以进行低温环境下电子式电流互感器激光供电的研究, 对提高设备可靠性, 推进工程应用具有实质的作用。

收稿日期: 2020-01-13; 修回日期: 2020-03-02

基金项目: 国家电网公司科技项目(B3441517K003)。

Project Supported by Science-technology Programs of SGCC(B3441517K003).

1 智能隔离断路器的结构

智能隔离断路器集成了断路器、接地开关、有源电子式电流互感器、合并单元、智能终端和在线监测装置等。有源电子式电流互感器的一次线圈集成于断路器与支柱绝缘子之间,其中罗氏线圈和低功率线圈(LPCT)分别作为保护和测量传感单元,取能线圈作为供能元件。采集器位于高压侧的采集器箱中,一次线圈通过屏蔽电缆与采集器连接,采集器的供电采用激光电源和取能线圈双路供电,在一次电流较大的情况下,由取能线圈为采集器提供工作电源,激光器不工作;在一次电流低于死区电流的情况下,切换为激光供能,实现供能无缝连接。激光器位于低压侧的合并单元中,激光电源及信号通过支柱绝缘子内置光纤传送,信号抗干扰能力强^[12-23]。智能隔离断路器及电子式电流互感器主结构图见图1。

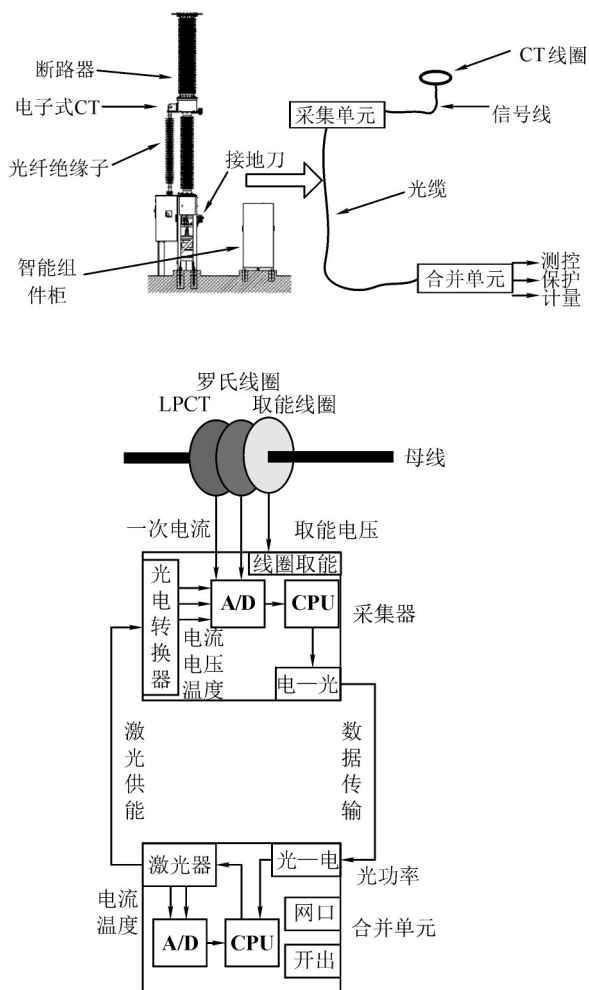


图1 智能隔离断路器及电子式电流互感器主结构图

Fig. 1 DCB and ECT main structure

2 工程现场运行异常现象

某智能变电站中多台220 kV隔离断路器电子

式电流互感器从监控后台上显示有“SV异常”及“采集通道中断”的告警信息。同时还发现,异常出现有时段现象,中午前后出现率低,早晚温度低(-20℃)时出现率极高。此次出现告警信息是在该站投运以来首次出现气温突然降低而出现的,故而推测此现象和环境温度有直接的关系。工程现场异常现象见图2。



图2 工程现场异常现象

Fig. 2 Abnormal phenomena at the project

查看合并单元的内部日志,发现有“采集通道中断”同时有“AD错误”信息,可判定是采集单元的电

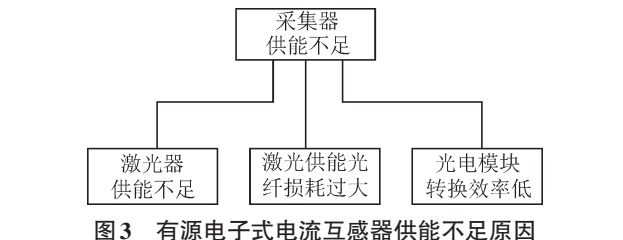


图3 有源电子式电流互感器供能不足原因

Fig. 3 Causes of insufficient energy supply of active ECT

3 试验研究及数据分析

有源电子式电流互感器的信号采集单元(以下简称采集器)与合并单元之间通过光纤复合绝缘子中的光纤进行数据传输和激光供能,由于激光器的温度特性、复合绝缘子的热机特性、光纤的温度特

性、光电模块的转换特性都受环境温度影响,所以环境温度变化可能对整个有源电子式电流互感器系统的激光供能造成影响,从而导致有源电子式电流互感器采集器激光供能故障。采用合理的激光器功率值及激光器功率软件控制方法可以弥补产品特性上的不足,消除温度对电子式电流互感器系统的影响。分别针对激光器、光纤和光电模块搭建3种不同的试验回路进行研究。

3.1 不同温度下激光器特性试验研究

试验时将采集器高低温箱的温度设定为常温25℃,以0.5℃/min温度变化速率,变化合并单元高低温箱的温度值,考虑合并单元为室内设备,温度范围适当的扩大,分别在-30、-20、-10、0、10、20、30、40、50、60℃温度点记录不同的激光器控制电压下的激光功率值,考虑激光器的输出是用于采集器供电,在保证采集器正常工作的情况下,激光器控制电压的范围选择为0.45~1.25V,按每0.1V递增。考虑个体差异,选取同一型号的3个激光器。

不同温度下激光器特性试验见图4,不同温度下激光器特性曲线见图5,激光器温度和功率的对应数据见表1。



图4 不同温度下激光器特性试验

Fig. 4 Experiment of laser characteristics at different temperatures

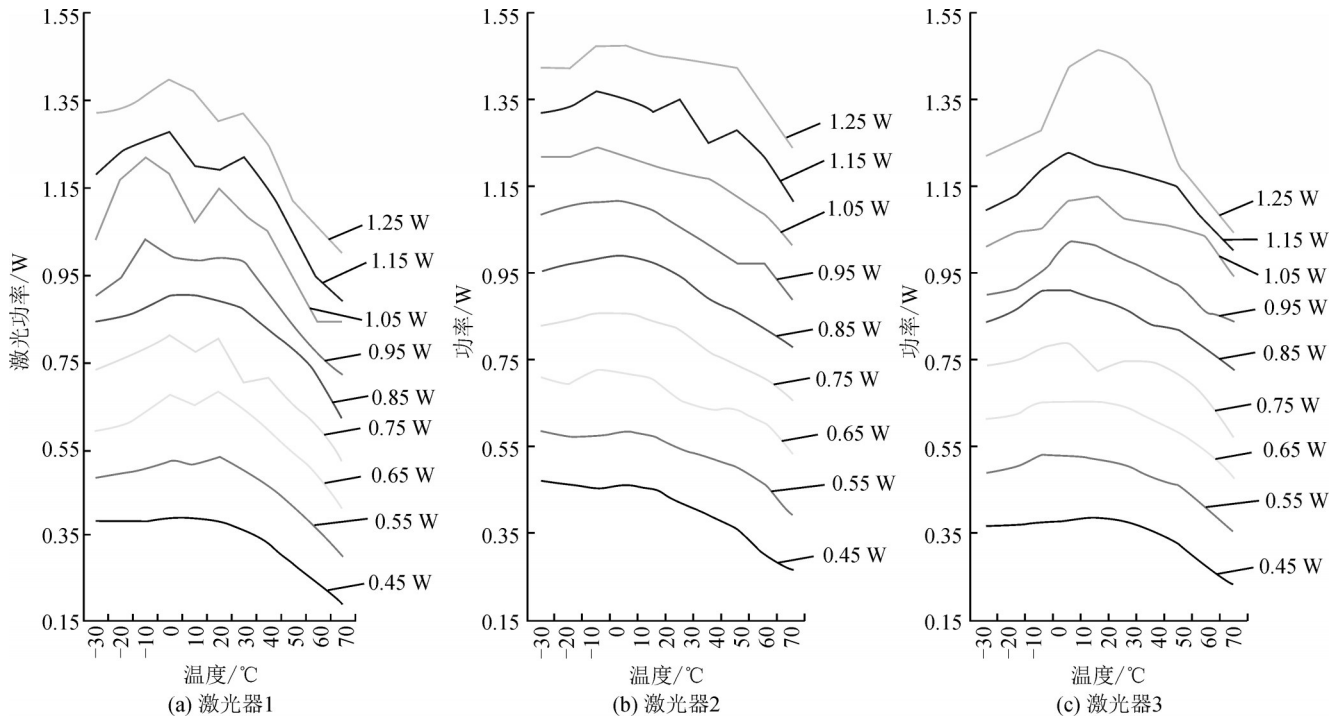


图5 不同温度下激光器特性曲线

Fig. 5 Laser characteristic curve at different temperatures

从曲线可以清楚的看出,激光器在20℃左右为功率的最优输出状态,随着温度的升高或者降低,输出的光功率都有下降。

3.2 不同温度下光纤特性试验研究

工程实际中的采集器和合并单元的光纤连接都是通过光纤绝缘子,所以试验将光纤绝缘子和普通光纤都放入高低温箱中,合并单元处在常温

25℃,改变光纤环境温度测量光纤的光损,来确定对激光供能的影响。根据工程实践和相关试验表明,温度越低光纤损耗越大,因此试验中选取-40~20℃的环境温度,按每5℃递增。选取了绝缘子的光纤和普通光纤,为体现个体差异,每种光纤用2根同型号进行试验。不同温度下光纤特性试验见图6,不同温度下光纤衰耗结果见表2。

表1 激光器温度和功率的对应数据

Table 1 Corresponding data of laser temperature and power

激光器控制电压/V		功率值/W									
		-30 ℃	-20 ℃	-10 ℃	0 ℃	10 ℃	20 ℃	30 ℃	40 ℃	50 ℃	60 ℃
激光器1	0.45	0.38	0.38	0.38	0.39	0.39	0.38	0.36	0.33	0.28	0.24
	0.55	0.48	0.49	0.50	0.52	0.51	0.53	0.50	0.46	0.42	0.36
	0.65	0.59	0.60	0.63	0.67	0.65	0.68	0.64	0.59	0.54	0.49
	0.75	0.73	0.75	0.78	0.81	0.77	0.80	0.70	0.71	0.65	0.60
	0.85	0.84	0.85	0.87	0.90	0.90	0.89	0.87	0.82	0.78	0.72
	0.95	0.90	0.94	1.03	0.99	0.98	0.99	0.98	0.91	0.83	0.77
	1.05	1.03	1.17	1.22	1.18	1.07	1.15	1.09	1.05	0.95	0.84
	1.15	1.18	1.23	1.26	1.28	1.20	1.19	1.22	1.15	1.05	0.94
	1.25	1.32	1.33	1.36	1.40	1.37	1.30	1.32	1.25	1.12	1.06
激光器2	0.45	0.47	0.46	0.45	0.46	0.45	0.42	0.39	0.36	0.30	0.27
	0.55	0.58	0.57	0.57	0.58	0.57	0.54	0.52	0.50	0.46	0.39
	0.65	0.70	0.69	0.72	0.71	0.70	0.65	0.63	0.63	0.60	0.53
	0.75	0.82	0.83	0.85	0.85	0.83	0.81	0.76	0.73	0.70	0.65
	0.85	0.94	0.96	0.97	0.98	0.96	0.93	0.88	0.85	0.81	0.77
	0.95	1.07	1.09	1.10	1.10	1.08	1.04	1.00	0.96	0.96	0.88
	1.05	1.20	1.20	1.22	1.20	1.18	1.16	1.15	1.11	1.07	1.00
	1.15	1.30	1.31	1.35	1.33	1.30	1.33	1.23	1.26	1.20	1.10
	1.25	1.40	1.40	1.45	1.45	1.43	1.42	1.41	1.40	1.31	1.22
激光器3	0.45	0.37	0.37	0.38	0.38	0.39	0.38	0.36	0.33	0.28	0.24
	0.55	0.49	0.50	0.53	0.53	0.52	0.51	0.48	0.46	0.41	0.36
	0.65	0.61	0.62	0.65	0.65	0.65	0.64	0.61	0.58	0.54	0.48
	0.75	0.73	0.74	0.77	0.78	0.72	0.74	0.74	0.71	0.66	0.57
	0.85	0.83	0.85	0.90	0.90	0.88	0.86	0.82	0.81	0.77	0.72
	0.95	0.89	0.90	0.94	1.01	1.00	0.97	0.94	0.91	0.85	0.83
	1.05	1.00	1.03	1.04	1.10	1.11	1.06	1.05	1.04	1.02	0.93
	1.15	1.08	1.11	1.17	1.21	1.18	1.17	1.15	1.13	1.05	0.99
	1.25	1.20	1.23	1.26	1.40	1.44	1.42	1.36	1.18	1.11	1.03

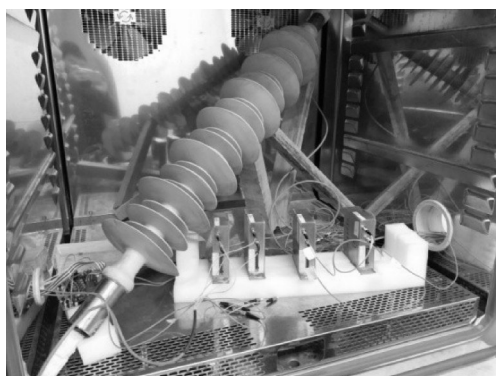


图6 不同温度下光纤特性试验

Fig. 6 Experiment of fiber characteristics at different temperatures

试验结果表明,随着温度的降低,光纤的损耗也随着增大,所以需要增加激光器的输出光功率才能保证采集器的正常工作。

表2 不同温度下光纤衰耗结果

Table 2 Fiber attenuation results at different temperatures

温度/℃	绝缘子中光纤		普通光纤	
	1号光纤	2号光纤	3号光纤	4号光纤
	衰耗/dBm	衰耗/dBm	衰耗/dBm	衰耗/dBm
20	-0.24	-0.36	-0.25	-0.46
-15	-0.62	-0.58	-0.55	-0.75
-25	-0.71	-0.85	-0.78	-0.86
-30	-0.80	-0.96	-0.85	-0.95
-35	-0.93	-1.08	-0.95	-0.98
-40	-1.13	-1.28	-1.02	-1.18

3.3 不同温度下光电模块特性试验研究

不同温度下光电模块特性试验见图7。将合并单元高低温箱的温度设定为常温25℃,变化采集器高低温箱的温度值为-40、-30、-20、-10、0、10、20、

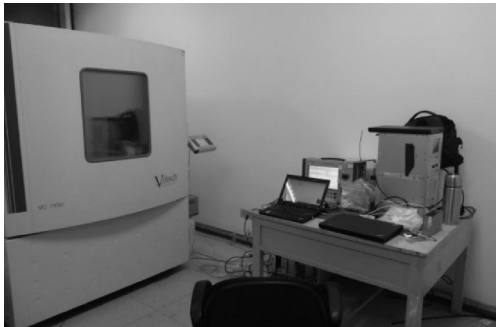


图7 不同温度下光电模块特性试验

Fig. 7 Experiment of photoelectric module characteristics at different temperatures

30、40、50、60 ℃, 调节不同的激光器控制电压 0.45~1.25 V, 得到在不同温度下的光电池电压数据和曲线见表 3 和图 8, 其中为了 AD 芯片不越限, 光电池进行 1/2 的分压。

试验结果表明, 随着温度的升高, 光电池的输

出电压也随之减小, 同样需要增加激光器的输出光功率才能保证采集器的正常工作。

4 解决方法的研究

综上所述, 激光器在温度的升高或者降低, 输出的光功率都有下降; 光纤损耗随着温度的降低而增大; 光电池的输出电压随着温度的升高而减小。有源电子式电流互感器在线监测中设置了光电池温度、激光器温度的测量, 所以光电池和激光器的温度变化值可以通过在线监测的数据, 结合特性曲线, 程序中进行补偿算法, 在不同的温度值, 补偿不同大小的激光器光功率。但是因光纤温度传感器植入较困难, 没有在线采集光纤温度, 所以只能在出厂时, 考虑光纤在不同温度下的损耗最大值, 将激光器的输出光功率留出-1.28 dBm 的裕度值。

表3 温度和光电池功率的对应数据

Table 3 Corresponding data of laser temperature and photocell power

V

激光器控制电压		光电池电压									
		-30 ℃	-20 ℃	-10 ℃	0 ℃	10 ℃	20 ℃	30 ℃	40 ℃	50 ℃	60 ℃
激 光 器 1	0.45	3.50	3.30	3.30	3.25	3.15	3.10	2.60	2.40	2.40	0.00
	0.55	3.51	3.45	3.41	3.38	3.31	3.27	3.20	3.13	3.08	3.02
	0.65	3.54	3.48	3.45	3.40	3.35	3.30	3.24	3.20	3.13	3.10
	0.75	3.53	3.46	3.44	3.41	3.34	3.31	3.22	3.20	3.15	3.10
	0.85	3.52	3.45	3.44	3.38	3.33	3.30	3.22	3.20	3.15	3.10
	0.95	3.49	3.43	3.42	3.36	3.31	3.28	3.21	3.18	3.14	3.09
	1.05	3.46	3.40	3.39	3.33	3.30	3.22	3.19	3.16	3.11	3.06
	1.15	3.44	3.38	3.36	3.31	3.27	3.19	3.16	3.15	3.08	3.05
	1.25	3.43	3.35	3.34	3.29	3.25	3.17	3.13	3.13	3.05	3.03
激 光 器 2	0.45	3.50	3.40	3.37	3.32	3.25	3.22	3.15	3.10	3.02	2.95
	0.55	3.53	3.46	3.42	3.39	3.32	3.28	3.23	3.18	3.12	3.07
	0.65	3.53	3.47	3.44	3.40	3.34	3.31	3.25	3.20	3.15	3.11
	0.75	3.53	3.46	3.44	3.40	3.33	3.30	3.26	3.20	3.15	3.10
	0.85	3.52	3.45	3.43	3.38	3.32	3.29	3.24	3.19	3.14	3.10
	0.95	3.51	3.43	3.42	3.37	3.31	3.28	3.23	3.18	3.13	3.09
	1.05	3.49	3.42	3.40	3.36	3.30	3.27	3.22	3.17	3.12	3.08
	1.15	3.47	3.40	3.39	3.34	3.29	3.26	3.21	3.16	3.11	3.07
	1.25	3.45	3.38	3.37	3.32	3.27	3.22	3.19	3.15	3.09	3.05
激 光 器 3	0.45	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	0.55	3.50	3.43	3.39	3.36	3.30	3.25	3.20	3.15	3.08	3.01
	0.65	3.52	3.45	3.43	3.39	3.33	3.29	3.23	3.20	3.13	3.09
	0.75	3.53	3.46	3.44	3.40	3.35	3.30	3.25	3.21	3.15	3.11
	0.85	3.53	3.46	3.44	3.39	3.34	3.30	3.24	3.21	3.15	3.11
	0.95	3.52	3.45	3.43	3.38	3.33	3.28	3.24	3.19	3.14	3.10
	1.05	3.51	3.44	3.42	3.37	3.32	3.27	3.23	3.18	3.13	3.09
	1.15	3.49	3.43	3.40	3.36	3.31	3.26	3.22	3.17	3.12	3.08
	1.25	3.46	3.41	3.38	3.34	3.28	3.25	3.22	3.15	3.11	3.07

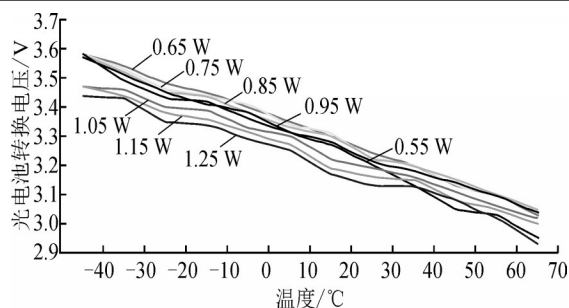


图8 不同温度下光电模块特性曲线

Fig. 8 Photoelectric module characteristic curve at different temperatures

激光器的温度补偿是根据激光器温度特性曲线和光电池温度特性曲线两大部分得到的,采用分段拟合的温度补偿方案,每隔10℃的相邻两个点内进行线性拟合,计算得出相应的补偿值。激光器及光电模块温度补偿曲线见图9、10。

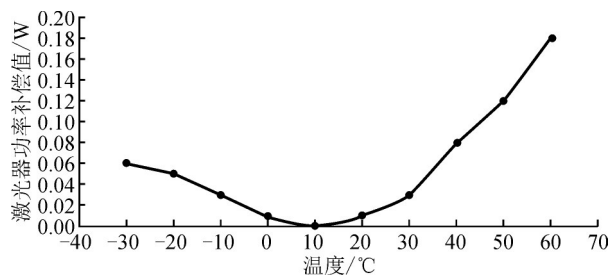


图9 激光器温度补偿曲线

Fig. 9 Laser temperature compensation curve

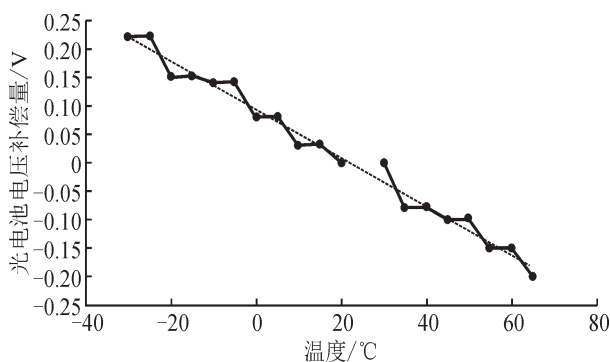


图10 光电模块温度补偿曲线

Fig. 10 Photoelectric module temperature compensation curve

根据激光器温度特性数据和光电池温度特性数据,见表4,在-40℃到70℃之间以间隔10℃的两点进行线性一次插值。

$$f(t)=f(t_1)+\frac{f(t_2)-f(t_1)}{t_2-t_1}(t-t_1) \quad (1)$$

从而得到整个温度范围内的激光功率补偿的拟合曲线。

表4 温度补偿曲线

Table 4 Temperature compensation cure

温度区间/℃	激光器温度补偿/W	光电池温度补偿/V
<-40	0.06	0.22
-40<t≤-30	0.06	0.06
-30<t≤-20	0.03-0.001t	0.01-0.007t
-20<t≤-10	0.01-0.002t	0.13-0.001t
-10<t≤0	0.01-0.002t	0.08-0.006t
0<t≤10	0.01-0.001t	0.08-0.005t
10<t≤20	-0.01+0.001t	0.06-0.003t
20<t≤30	-0.03+0.002t	0.16-0.008t
30<t≤40	-0.12+0.005t	-0.02-0.002t
40<t≤50	-0.08+0.004t	0.10-0.005t
50<t≤60	-0.18-0.006t	0.10-0.005t
60<t≤70	0.18	-0.20
t>70	0.18	-0.20

程序中,提前预设各个温度区间的函数,通过采集激光器的温度值和接收光电池的温度值,先判断温度值是否超出调节的范围,再判断此时温度值的温度区间,根据该区间的拟合函数计算补偿值,最后转换为激光功率的控制电压,进行激光功率的调节。为了保证采集器工作的可靠性,除了温度补偿调节激光功率外,还将采集器的光电池电压6.0 V设置为目标值来进行微调,形成一套采集、传输、调节、采集的闭环调节系统,达到采集器工作正常,且激光器输出的光功率最小的目的。激光温度补偿流程图见图11。

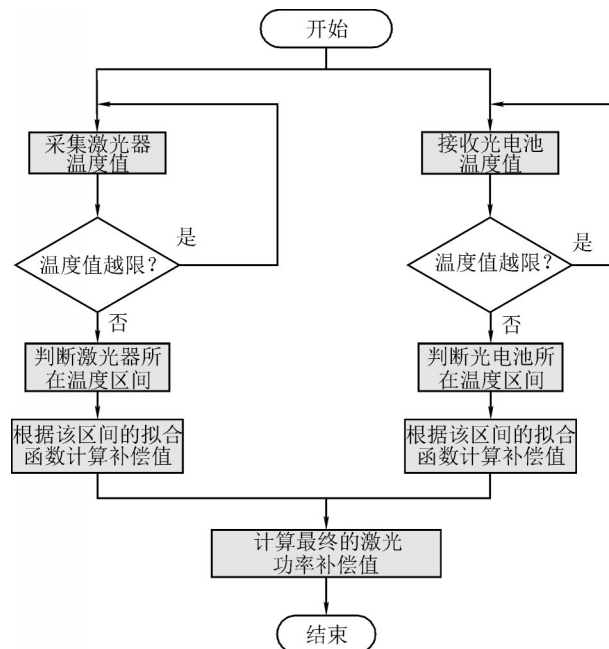


图11 激光温度补偿流程图

Fig. 11 Flow chart of laser temperature compensation

5 工程应用

将解决方法应用到前述运行异常的工程中, 不仅异常现象消失, 而且自投运以来一直运行安全可靠, 后续又应用到了多个智能变电站。工程现场应用的电子式电流互感器见图 12, 工程现场隔离断路器应用的后台显示见图 13。



图 12 工程现场应用的电子式电流互感器

Fig. 12 ECT in engineering field



图 13 工程现场隔离断路器应用的后台显示

Fig. 13 Background display of application of isolating circuit breaker in project

6 结语

文中以某个智能隔离断路器的电子式电流互感器, 在低温情况下工作异常现象做为研究点, 通过详细分析, 确定原因为电子式电流互感器的激光供电问题, 经查阅相关资料、搭建试验回路研究、数据分析、解决方案及验证到工程现场应用, 解决问题的思路 and 措施, 为目前新一代智能变电站隔离断路器用电子式电流互感器的可靠运行和进一步推广提供了一些思想和方法。

参考文献:

[1] 曾林翠, 白世军, 李毅, 等. ZCW9-252 智能隔离断路器中光学电流互感器的应用[J]. 高压电器, 2016, 52(9): 184-189.

ZENG Lincui, BAI Shijun, LI Yi, et al. Application of OCT in ZCW9-252 intelligent disconnecter circuit-breaker[J]. High Voltage Apparatus, 2016, 52(9): 184-189.

[2] 杨武志, 潘济猛. 500 kV 电子式互感器工程应用研究[J]. 南方电网技术, 2011, 5(6): 110-113.

YANG Wuzhi, PAN Jimeng. Research of 500 kV electronic instrument transformer in engineering application[J]. Southern Power System Technology, 2011, 5(6): 110-113.

[3] 高鹏, 马江泓, 杨妮, 等. 电子式互感器技术及其发展现状[J]. 南方电网技术, 2009, 3(3): 39-42.

GAO Peng, MA Jianghong, YANG Ni, et al. Electronic transducer technology and its current development[J]. Southern Power System Technology, 2009, 3(3): 39-42.

[4] POLYCARPOU A A, SOOM A, PETER J W, et al. Event timing and shape analysis of vibration bursts from power circuit breakers[J]. IEEE Trans. Power Delivery, 1996, 11(2): 848-857.

[5] 翁韶芳, 孙丹婷. 电子式电压互感器传感元件的分析及实验[J]. 南方电网技术, 2008, 2(5): 55-58.

WENG Shaofang, SUN Danting. Analysis and experiment of the sensor in new electronic voltage transformers[J]. Southern Power System Technology, 2008, 2(5): 55-58.

[6] 罗苏南, 田朝勃, 赵希才. 空心线圈电流互感器性能分析[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(3): 108-113.

LUO Sunan, TIAN Chaobo, ZHAO Xicai. Performance analysis of air-core current transformer[J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(3): 108-113.

[7] 林莘. 现代高压电器技术[M]. 北京: 机械工业出版社, 2002.

LIN Xin. Modern high voltage apparatus technology[M]. Beijing: China Machine Press, 2002.

[8] MEPELINK J, DIEDERICH K J, FESER K. Very fast transients in GIS[J]. IEEE Transaction on Power Delivery, 1989, 4(1): 223-228.

[9] 谷定燮, 修木洪, 戴敏, 等. 1 000 kV GIS 变电所 VFTO 特性研究[J]. 高电压技术, 2007, 33(11): 27-32.

GU Dingxie, XIU Muhong, DAI Min, et al. Study on VFTO of 1 000 kV GIS substation[J]. High Voltage Engineering, 2007, 33(11): 27-32.

[10] YAMAGATA Y, NAKADA Y, NOJIMA K. Very fast transients in 1 000 kV gas insulated switchgear[J]. IEEE Power Engineering Society Transmission and Distribution, 1999(5): 501-508.

[11] BOERSMA R. Transient ground potential rises in gas insulated substations with respect to earthing systems[J]. Electra, 1987, 126(3): 47-54.

[12] 闫少俊. GIS 智能变电站电子式互感器技术[M]. 北京: 中国电力出版社, 2015.

YAN Shaojun. The electronic transformer technology for GIS smart substation[M]. Beijing: China Electric Power

- Press, 2015.
- [13] 张桂红, 郭洁, 徐燕飞. GIS中的电磁暂态现象[J]. 高压电器, 2006, 42(5): 349-351.
ZHANG Guihong, GUO Jie, XU Yanfei. Transient electromagnetic phenomena in GIS[J]. High Voltage Apparatus, 2006, 42(5): 349-351.
- [14] 林莘, 李爽, 徐建源. 特高压GIS壳体过电压特性[J]. 沈阳工业大学学报, 2009, 31(6): 606-610.
LIN Xin, LI Shuang, XU Jianyuan. Enclosure over-voltage characteristics of UHV GIS[J]. Journal of Shenyang University of Technology, 2009, 31(6): 606-610.
- [15] AMIR M, BINDER C. Investigation of transient phenomena in inner and outer systems of GIS due to disconnector operation[R]. Lisbon: International Conference on Power Systems Transients, 1995: 3-7.
- [16] 钟连宏, 欧世尧, 周红霞. GIS中快速暂态过电压的分析及计算[J]. 高电压技术, 2000, 26(1): 60-62.
ZHONG Lianhong, OU Shiyao, ZHOU Hongxia. Analysis and calculation of very fast transient overvoltage in GIS[J]. High Voltage Engineering, 2000, 26(1): 60-62.
- [17] DICK E P, FUJIMO TO N. Transient ground potential rise in gas-insulated substations - problem identification and mitigation[J]. IEEE Trans. PA & S, 1982, 101(10): 3610.
- [18] 国家电网公司. 新一代智能变电站关键技术初探[R]. 北京: 国家电网公司, 2012.
State Grid Corporation of China. Discussion on the key technology of new generation intelligent substation[R]. Beijing: State Grid Corporation of China, 2012.
- [19] 国家电网公司. 新一代智能变电站关键设备研制框架研究报告[R]. 北京: 国家电网公司, 2012.
State Grid Corporation of China. The key equipment development framework research report of the new generation of intelligent substation[R]. Beijing: State Grid Corporation of China, 2012.
- [20] 宋璇坤, 李敬如, 肖智宏, 等. 新一代智能变电站整体设计方案[J]. 电力建设, 2012, 33(11): 1-6.
SONG Xuankun, LI Jingru, XIAO Zhihong, et al. Overall design scheme for new generation intelligent substation[J]. Electric Power Construction, 2012, 33(11): 1-6.
- [21] 宋璇坤, 刘开俊, 沈江. 新一代智能变电站研究与设计[M]. 北京: 中国电力出版社, 2014.
SONG Xuankun, LIU Kaijun, SHEN Jiang. Research and design of a new generation intelligent substation[M]. Beijing: China Electric Power Press, 2014.
- [22] 赵丽华, 高进强, 郭相国. 浅谈电力设备智能化[J]. 高压电器, 2010, 46(12): 1-4.
ZHAO Lihua, GAO Jinqiang, GUO Xiangguo. Discussion on intelligent electric power equipment[J]. High Voltage Apparatus, 2010, 46(12): 1-4.
- [23] 鄢志平, 聂一雄, 邓忠华. 基于IEC 61850的合并单元与二次设备通信研究[J]. 高压电器, 2009, 45(2): 27-30.
YAN Zhiping, NIE Yixiong, DENG Zhonghua. Research on communication between merging unit and secondary devices based on standard IEC 61850[J]. High Voltage Apparatus, 2009, 45(2): 27-30.
- 王传川(1970—), 男, 高级工程师, 主要研究方向为高压电器研发及工程应用。
- 白世军(1981—), 男, 博士研究生, 主要研究方向为智能变电站电磁兼容、智能组件及电力设备故障诊断与状态评估。
- 李毅(1987—), 男, 硕士, 工程师, 主要研究方向为检测技术与自动化装置。

(上接第134页)

- different magnetization curves on simulation for transformer core loss under DC bias[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2014, 29(5): 43-48.
- [19] 王洋, 刘志珍. 基于Jiles Atherton磁滞理论的直流偏磁下铁心损耗预测[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(1): 313-323.
WANG Yang, LIU Zhizhen. The forecasting method of core loss under DC bias based on the Jiles Atherton hysteresis theory[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(1): 313-323.
- [20] 程志光, 高桥则雄, 博扎德·弗甘尼. 电气工程电磁热场的模拟与应用[M]. 北京: 科学出版社, 2009: 247-293.
CHENG Zhiguang, TAKAHASHI N, FORGHANI B. Electromagnetic and thermal field modeling and application in electrical engineering[M]. Beijing: Science Press, 2009: 247-293.
- 赵志刚(1981—), 男, 副教授, 研究方向为工程电磁场与磁技术。
- 尹赛宁(1993—), 男, 硕士研究生, 研究方向为工程电磁场与磁技术。