

全光纤电流互感器关键器件故障模式分析

商和龙¹ 李洪全¹ 周康¹ 张书源¹ 李军¹ 王新刚¹ 施广宇² 王康² 王国彬²

(1. 山东电力设备有限公司 济南 250022; 2. 国网福建省电力有限公司电力科学研究院 福州 350007)

摘要: 以全光纤电流互感器的光学和电学器件为研究对象,阐述了系统工作原理及结构组成,通过故障模式影响及危害性分析和故障树分析两种方法对系统进行了可靠性分析,参考互感器在变电站中的应用实例确定了系统的关键器件故障模式,构建了系统光路单元的故障树,根据故障风险优先级数的大小,确定了设计薄弱环节并提出了改进措施,可降低系统关键器件发生故障的风险。针对全光纤电流互感器的实际故障案例进行了分析,验证了系统可靠性分析方法的有效性。

关键词: 全光纤电流互感器;故障模式影响及危害性分析;故障树分析

中图分类号: TM452; TN256 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 470.4017

Analysis on critical component failure mode of fiber optical current transformer

Shang Helong¹ Li Hongquan¹ Zhou Kang¹ Zhang Shuyuan¹ Li Jun¹

Wang Xingang¹ Shi Guangyu² Wang Kang² Wang Guobin²

(1. Shandong Power Equipment Co. Ltd., Jinan 250022, China;

2. Electric Power Research Institute of Fujian Electric Power Limited Company, Fuzhou 350007, China)

Abstract: The optical and electrical components of fiber optical current transformer (FOCT) are studied. The principle and structure of the system are described. By means of FMECA and FTA the reliability analysis of the system is made. Through the fault cases in practical application, the critical component failure modes of the system are determined. The fault tree of the optical unit is constructed. According to the risk priority number of failures the design weak points are determined and the improve measures are put forward. In this way the risks of critical components failure can be reduced. The fault cases of FOCT are analyzed and the validity of the system reliability analysis method is verified.

Keywords: fiber optical current transformer (FOCT); failure mode effects and criticality analysis (FMECA); failure tree analysis (FTA)

0 引言

随着电力系统向大容量和特高压方向发展,对电力设备小型化、智能化、高可靠性的要求越来越高。近年来,伴随光纤和电子技术的进步,各种电子式互感器得到了迅猛的发展。区别于传统互感器,电子式互感器具有质轻体小、绝缘性能优良、抗电磁干扰能力强、动态测量范围大、频率响应范围宽、灵敏度高和便于实现智能化等优点^[1]。其中全光纤电流互感器是电子式电流互感器的主要技术路线之一,具备上述电子式互感器的通用优势,同时由于测量原理是利用了电流感生磁场对光纤中传播光束造成的相位差,故除可测量交流电流外,还可以测量直流电流。

为进一步促进电子式互感器关键技术的研究,提升产品的长期可靠性与稳定性,完善电子式互感器的技术标准,

国家电网公司科技部分别于2011年、2015年两次委托中国电科院对电子式互感器性能检测方案进行修订完善,从实用性等方面对电子式电流互感器性能进行全面检测。但根据检测结果及挂网考核平台运行结果看,电子式电流互感器在长期运行过程中仍存在采集器故障、光纤故障、合并单元故障、绝缘受潮、噪声干扰等问题^[2]。互感器作为保证电力系统安全和可靠运行的重要设备,其失效或故障往往造成很大的损失,这些问题不仅影响了变电站智能化的进程,同时也制约着产品的规模化应用。

根据上述现状,本文分别从光路器件和电路器件的故障模式分析入手,参考全光纤电力互感器在智能变电站中的运行情况,总结出全光纤电流互感器系统关键器件故障模式,以便提取故障预测参数,为后续故障在线主动预测系统的搭建奠定基础。

1 全光纤电流互感器基本原理

如图 1 所示。全光纤电流互感器基于 Ampere 环路定律和 Faraday 磁光效应进行电流测量,当线偏振光通过磁场作用下的某些介质时,其偏振面受到正比于外加磁场平行于传播方向分量的作用而发生偏转,通过该偏转角度就可以得到被测电流的大小。因此在进行全光纤电流互感器总体方案设计时,光路方面以获得理想线偏振光与 Faraday 旋光效应作为核心,电路以微弱信号放大处理与波形调制作为核心。

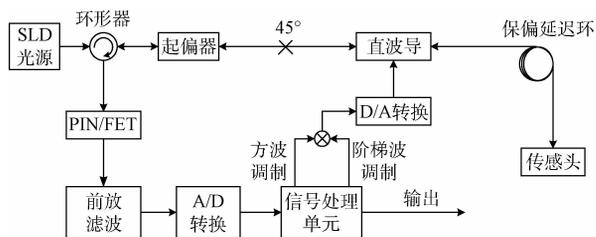


图 1 数字闭环全光纤电流互感器工作原理

互感器包括光路和检测电路两部分,光路结构采取反射式、干涉型结构:光源发出的光经过起偏器后,在 45°熔接点的作用下随即分成两束正交的线偏振光,沿着保偏光纤的两个模式传输至传感头。在 1/4 波片作用下,两束线偏振光分别被转化为左旋圆偏振光和右旋圆偏振光,两圆偏振光进入传感光纤,由于 Faraday 磁光效应作用,传感光纤中两偏振光的传输速度不同,从而产生法拉第相差。当两圆偏振光传输到传感光纤末端时,发生镜面反射,两束光经模式互换后沿原光路返回, Faraday 效应加倍,并且在 1/4 波片处再次转变为两束模式正交的线偏振光。最终,携带 Faraday 效应相位信息的两束光在起偏器处发生干涉,通过耦合器耦合进入光电探测器,进行后续信号的处理。

根据全光纤电流互感器的工作原理,可将系统结构框架分为图 2 所示几个部分。

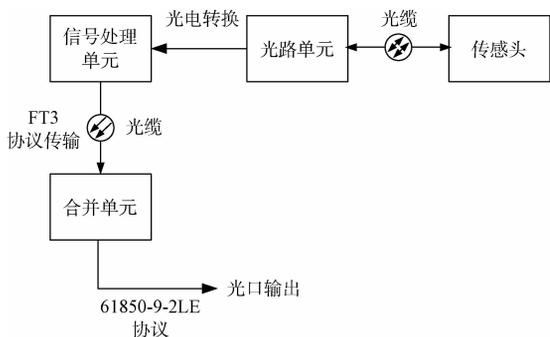


图 2 数字闭环全光纤电流互感器结构框架

传感头:实体结构为一金属圆环,内含传感光纤,光纤内传输的偏振光受到电流产生的磁场作用发生相位变化,从而实现光信息中携带有电流信息。

光路单元:光路单元为采集模块的一部分,采集模块安

装于机箱中,机箱安装于智能组件柜中。光路单元中 SLD 光源发出的光通过起偏器获得理想的线偏振光,线偏振光在 1/4 波片处转化为左旋、右旋圆偏振光,两圆偏振光在电流产生的磁场作用下产生法拉第相差,到达反射镜后反射,经过模式互换后沿原光路返回抵达光电探测器处进行信号的探测与数据处理。光路采取闭环反射式、干涉型结构,具有良好的互易性,干涉结果最终只携带了 Faraday 磁光效应产生的相位信息。

信号处理单元:信号处理单元同样为采集模块的一部分,该部分采用以方波调制和相干调制为基础的数字锁相放大器,采取方波相位调制技术及闭环阶梯波反馈技术进行数据信号处理^[3],实现光信号转化为电信号的功能,并根据 FT3 通信协议格式要求实现数据输出。

合并单元:对光电单元输出的 FT3 格式数字量进行合并与处理,并按 IEC61850-9-2LE 标准转换成以太网数据,通过光纤输出到过程层网络或间隔层相关智能电子设备^[4],实现智能化。

传输光缆:实现高低压侧隔离的同时进行信号传输,一方面将光路单元的线偏振光传输至传感头,供其感应待测电流;另一方面将携带电流值信息的光信号传输至采集模块信号处理单元,进行信号数据处理。

2 全光纤电流互感器的可靠性分析

全光纤电流互感器系统存在较多的光学和电学器件,可靠性分析难度较大。目前可靠性分析的方法主要有可靠性框图(RBD)、故障树分析(FTA)、故障模式影响及危害性分析(FMECA)等^[5]。其中 FMECA 与 FTA 是工程中最有效的可靠性分析方法,在系统故障模式分析中得到广泛应用,因此本文综合采用这两种方法对光路和电路故障模式进行分析。

2.1 全光纤电流互感器的故障模式影响及危害性分析

故障模式影响及危害性分析(FMECA)是贯穿于产品设计生产全过程,自上而下的分析方法。该方法通过对产品各结构单元的潜在故障模式及其对系统的影响进行分析,并将每一个潜在的故障模式按风险程度予以分类,提出可能采取的设计或工艺的改进措施,以提高产品的可靠性^[6]。

FMECA 分为 3 个主要阶段:定义系统、FMEA 表格分析以及 CA 危害性分析。

在采用 FMECA 法对全光纤电流互感器进行可靠性分析以前,先将全光纤电流互感器系统的各个组成部分进行细分,作为 FMEA 表格建立的依据^[7]。全光纤电流互感器的可靠性框图如图 3 所示。



图 3 全光纤电流互感器可靠性框图

在系统可靠性框图的基础上,对各部分采用 FMEA 法分析,列出工作表。工作表应包括故障模式、故障后果、故障检验

方法和补救措施等内容。按照可靠性框图对全光纤电流互感器的主要功能部分列出 FMEA 工作表如表 1~4 所示。

表 1 高压侧传感头 FMEA 表

故障模式	故障后果	故障检验方法	补救措施
传感光纤老化	测量精度变差	准确度试验	选用性能优良的传感光纤
反射镜脱落	系统工作异常	光时域反射法 ^[8]	改进镀膜工艺
毛细管密封失效	全温测量精度变差	温度循环试验	选用性能优良的密封胶
紧固件松动	测量精度变差	准确度试验	重新紧固

表 2 低压侧光路单元 FMEA 表

故障模式	故障后果	故障检验方法	补救措施
光源失效	无光信号输出,系统工作异常	软件监测	选用性能优良的 SLD 光源
光源散热不好	光功率下降,波长漂移	软件监测	提高装配工艺
恒流驱动电路故障	光功率下降,波长漂移	软件监测	选用性能优良的电子器件
光学器件固化胶老化	光学器件性能变差	软件监测	选用性能优良的光学器件
光学器件尾纤断裂	光路断开,系统工作异常	光时域反射法	提高装配工艺
直波导失效	系统工作异常	开关闭环反馈	选用性能优良的直波导
PINFET 连接不牢	信号不稳定,系统工作异常	重新插拔	提高装配工艺
PINFET 性能变差	测量精度变差	准确度试验	选用性能优良的 PINFET
PINFET 击穿	系统工作异常	示波器测量	加强电磁兼容防护
光学器件温度特性变差	全温测量精度变差	温度循环试验	选用性能优良的光学器件

表 3 低压侧信号处理 FMEA 表

故障模式	故障后果	故障检验方法	补救措施
供电电源模块故障	系统上电后完全无反应	万用表测量	加强电磁兼容防护
电源转换芯片故障	电源指示灯亮,系统工作异常	万用表测量	选用性能优良的电源转换芯片
电路板老化	系统可靠性变差	电参数检测	选用性能优良的电路板
滤波电路器件故障	测量精度变差	示波器测量	选用性能优良的滤波器件
FPGA 故障	系统工作完全失效	软件监测	选用性能优良的 FPGA
A/D 转换芯片故障	无数字信号输入,系统工作异常	示波器测量	选用性能优良的 A/D 转换芯片
D/A 转换芯片故障	系统闭环反馈失效,工作异常	示波器测量	选用性能优良的 D/A 转换芯片
光口收发模块故障	数据收发失效	通信握手判断	选用性能优良的光口收发模块
电路器件温度特性变差	全温测量精度变差	温度循环试验	选用温漂小的电子器件

表 4 保偏光缆 FMEA 表

故障模式	故障后果	故障检验方法	补救措施
光纤断裂	光缆损坏	光时域反射法	改进光纤防护工艺
光纤损耗增大	影响数据传输性能	光时域反射法	选用可靠性高的保偏光纤
保护结构缺陷	光缆损坏	光时域反射法	选用性能优良的保偏光纤

在系统的故障模式及影响分析完毕后,应进一步进行危害性分析,按照每一故障模式的严重程度、发生概率及易发现性所产生的综合影响进行分类,以全面评价系统中可能出现的部件故障的影响(表 5)。

严重程度分级决定于系统在极端情况下故障可能发

展得到的危害状态,该数值有助于排定故障模式及其影响的轻重缓急次序。同样,也可以为每种故障模式赋予一个范围为 A~E 的概率分级,如果出现频度高,就需要确定出行动措施,通常采取的方法包括分析、计算、有限元法以及类似故障的历史记录统计(表 6)。

表 5 严重程度分级

分级	意义
I	对系统可靠性及安全无显著影响
II	非常微小的故障,只对系统维护有一定影响
III	轻微故障,只对系统部分次要功能产生影响
IV	普通故障,会造成一定经济损失
V	严重故障,造成系统主要功能失效
VI	灾难性故障,可能造成安全事故产生人员伤亡

表 6 出现概率分级

分级	意义
A	非常罕见
B	少见
C	偶然
D	很可能(故障重复出现)
E	频繁(故障几乎无法避免)

风险优先级数是在对严重程度、出现概率和易发现性进行分级之后,评价这些行动措施方面的阈值。对于整个设计过程而言,这是一项必须完成的工作,一旦完成,最大关注范围的确定工作就会变得轻松。就纠正措施而言,风险优先级数最高的故障模式应当获得最高的优先级别。这就是说,严重程度分级最高的故障模式并不一定就应当首先加以处理,首先应当处理的可能是那些严重程度相对较低,但更常发生且不太易于发现的故障。风险优先级数的选择可以参考表 7。

表 7 风险优先级数

重要程度	I	II	III	IV	V	VI
A	低	低	低	低	中等	高
B	低	低	低	中等	高	不可接受
C	低	低	中等	中等	高	不可接受
D	低	中等	中等	高	不可接受	不可接受
E	中等	中等	高	不可接受	不可接受	不可接受

全光纤电流互感器系统存在的所有故障之间风险优先级数存在很大差异,通过对工程应用中出现的故障模式的统计与分析,可为系统关键器件的确定提供依据。

国网公司曾在 2011 年组织专家赴工程现场及设备厂家进行调研,并召开了专题研讨会,结合运行经验,对电子式互感器在工程设计、设备选型、运行维护等方面的技术问题进行了深入的分析。调研显示,采集器故障、光纤故障和测量温漂高居无源电子式互感器故障的前 3 位^[8-9]。其中,光纤故障属于制造工艺问题,可以通过结构及工艺改进来规避,测量温漂属于原理性问题,需通过自补偿及外部补偿来满足工程应用标准,采集器故障属于长期可靠

性问题,特别是光学器件属于相对易耗器件,长期运行时性能可能产生劣化,尚需一定的运行年限来进一步考查。

针对以上问题,中国电科院于 2011 年起组织开展电子式互感器专业性能检测^[10],对电子式互感器的全面性能进行有效检验,同时组织开展电子式互感器的长期带电考核,模拟现场环境运行,以提前发现产品潜在的缺陷。分析最近一次的带电考核结果,故障缺陷按性质可分为 3 类:设计故障、元器件故障以及安装调试工艺缺陷。其中,元器件故障尤以光源为代表的光学器件故障以及供电电源故障为甚,相关故障即为系统的关键故障,故障危害性分析如表 8 所示。

表 8 关键故障 CA 表

故障模式	严重程度	出现概率	风险优先级
光源失效	V	B	高
光源散热不好	III	C	中等
恒流驱动电路故障	IV	A	低
光学器件固化胶老化	III	B	低
光学器件尾纤断裂	V	C	高
直波导失效	V	A	中等
PINFET 连接不牢	V	B	高
PINFET 性能变差	VI	A	低
PINFET 击穿	V	A	中等
光学器件温度特性变差	IV	C	中等
供电电源模块故障	V	B	高
电源转换芯片故障	V	B	高

2.2 全光纤电流互感器的故障树分析

故障树分析法是以对系统影响最大最不希望的事情作为顶事件,分析造成系统故障的原因并进行逐级分解作为中间事件,一直到将不能分解的事件作为底事件,这样就可以得到一个树状的结构图,也就是所熟知的故障树^[11]。故障树主要由一些逻辑门组成,与门表示只有当所有输入事件均发生时,输出事件才发生;或门表示只要有一个输入事件发生,输出事件就发生。故障树既可以反映基本事件对系统造成的影响,也可以反映几个基本事件的组合对系统的影响,是一种分析系统故障十分有效的方法。

在对全光纤电流互感器进行 FMECA 的基础上,以关键模块的故障模式为顶事件,可构建全光纤电流互感器关键器件的故障树。低压侧光路单元为全光纤电流互感器故障风险优先等级最高的模块,以其为例画出故障树,如图 4 所示。

根据上述建立的故障树对低压侧光路单元进行定性分析^[12],用下行法求出系统的最小割集,从顶事件逐级向下,根据逻辑关系分行表示,若是或门,则将输入事件列入不同行;若是与门,则将输入事件排列入同一行。依次分

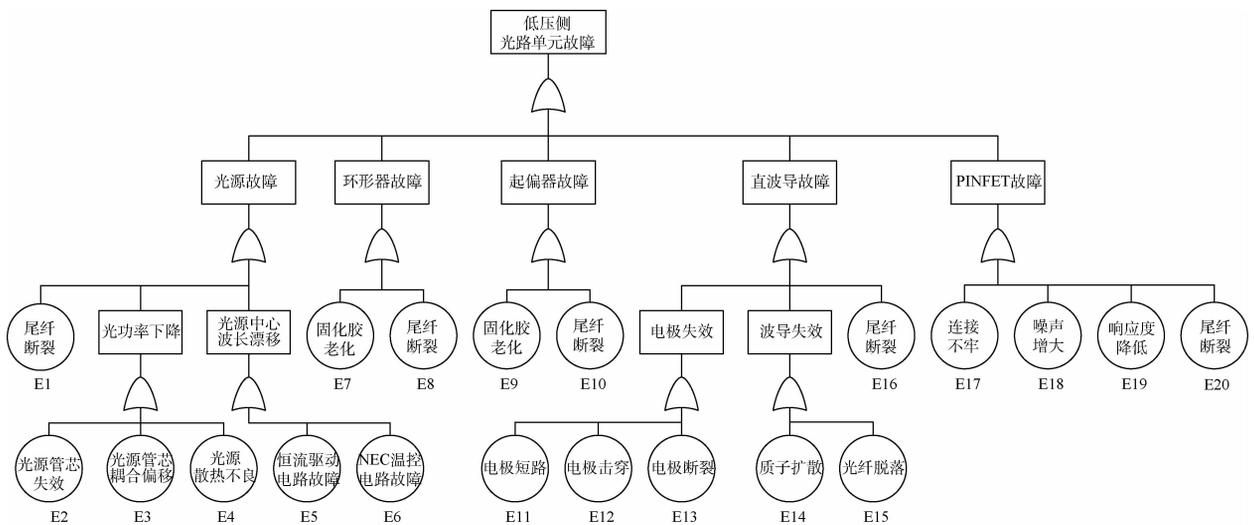


图4 低压侧光路单元故障树

解,直到找到不能再分的基本事件为止。根据该法求得所有的最小割集都为一阶最小割集,即上述的底事件中任何一个发生都会导致光路单元故障。

3 全光纤电流互感器故障案例分析

对全光纤电流互感器进行基本准确度试验,初期测试一切正常,突然间失去全部输出,参数监测软件也丢失通信,反复上电后故障并未消除。对照系统 FMEA 工作表,故障现象为“系统工作完全失效”,对应的故障为“低压侧信号单元 FPGA 失效”,经过元器件更换比照及万用表测量后,故障确定为 FPGA 提供电源的电源转换芯片损坏。更换芯片后,系统工作恢复正常。

对全光纤电流互感器进行全温度循环准确度试验,在高温过程中,系统输出精度变差,观察参数监测软件,SLD 驱动电流出现较大波动,光源温度持续升高,NEC 制冷电流急剧上升,其余参数正常。对照系统 FMEA 工作表和光路单元故障树,故障现象为“光功率下降,波长漂移”,同时光源和温控电路尚可正常工作,最终锁定故障为“光源散热不好”。在光源背面重新涂抹导热硅脂后,再次进行全温度循环准确度试验,系统工作正常,故障排除。

4 结 论

全光纤电流互感器在绝缘性能和动态性能等方面具有显著优势,但在前期变电站试点应用中,也暴露出稳定性较差等问题。针对这些存在的问题,本文对全光纤电流互感器的故障模式进行了详细的分析,通过对工程应用中互感器故障统计确定了易发生故障的系统关键器件,并借助故障案例分析验证了可靠性分析方法的有效性,根据分析结果对产品设计及工艺进行改进,能有效的改进产品的薄弱环节,大大降低发生故障的机率,提高产品的可靠性。

与此同时对系统关键器件的故障分析也存在一些不足,如面对复杂的系统故障高度依赖人员经验判断等。下一步工作应将可靠性分析得到的故障模式与计算机专家系统等诊断技术^[13]相结合,最终达到故障在线主动预测的目的。

参考文献

- [1] 韩克俊,李军,闫冠峰,等. 全光纤电流互感器 $\lambda/4$ 波片技术研究及探讨[J]. 电测与仪表, 2015, 52(6): 102-106.
- [2] 国家电网公司. 电子式互感器应用现状调研分析报告[S]. 2011.
- [3] 王夏霄,张春熹,张朝阳,等. 一种新型全数字闭环光纤电流互感器方案[J]. 电力系统自动化, 2006, 30(16): 77-80.
- [4] 赵应兵,周水斌,马朝阳. 基于 IEC61850-9-2 的电子式互感器合并单元的研制[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(6): 104-106.
- [5] ROUVROYE J L, BLIEK VAN DEN E G. Comparing safety analysis techniques[J]. Reliability Engineering and System Safety, 2002, 75(3): 289-94.
- [6] GJBZ 2006. 故障模式,影响及危害性分析指南[S]. 2006.
- [7] 王鹏,张贵新,朱小梅,等. 基于故障模式与后果分析及故障树法的电子式电流互感器可靠性分析[J]. 电网技术, 2006, 30(23): 15-20.
- [8] 王安帮,王云才. 混沌激光相关法光时域反射测量技术[J]. 中国科学: 信息科学, 2010, 43(3): 512-518.
- [9] 童悦,张勤,叶国雄,等. 电子式互感器电磁兼容性

- 能分析[J]. 高电压技术, 2013, 39(11):2829-2835.
- [10] 刘彬, 叶国雄, 郭克勤, 等. 电子式互感器性能检测及问题分析[J]. 高电压技术, 2012, 38(11): 2972-2980.
- [11] 袁玉勇, 李开宇, 刘文波. 光电雷达电子部件故障树分析[J]. 电子测量技术, 2016, 39(6):149-152.
- [12] 马静, 辛波. 基于空间应用环境的光纤陀螺可靠性分析[J]. 中国惯性技术学报, 2006, 14(6):81-85.
- [13] 金鑫, 任献彬, 周亮. 智能故障诊断技术研究综述[J]. 国外电子测量技术, 2009, 28(7):30-32.

作者简介

商和龙, 1988年出生, 硕士, 工程师, 主要从事一次设备智能化研究工作。

E-mail: helong.shang@gmail.com