

高温超导电缆监测与保护系统下层机单元的研制

蔡磊, 张哲, 张勇刚, 杨军

(华中科技大学电气与电子工程学院, 湖北 武汉 430074)

摘要: 高温超导电缆监测与保护系统集保护、运行状态在线监测、正常与故障数据记录等诸多功能为一体, 采用分层式结构形式。该文重点介绍了下层监测与保护单元的功能特点、硬件结构、基本保护策略和相关算法, 并对软件的基本流程进行了系统说明。该装置已投入现场运行, 取得了良好的运行效果。

关键词: 高温超导电缆; 失超保护; 继电保护; 数据记录

中图分类号: TM917 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-4897(2005)11-0055-04

0 引言

2004 年 4 月, 国内第一条 35 kV 三相交流高温超导电缆在云南普吉变电站投入并网试运行^[1], 这也是继美国、丹麦之后世界上第三条投入现场运行的超导电缆。整个高温超导电缆系统包括超导电缆本体和端头、制冷系统以及超导电缆监测与保护系统等部分^[2], 其基本结构框图如图 1 所示。

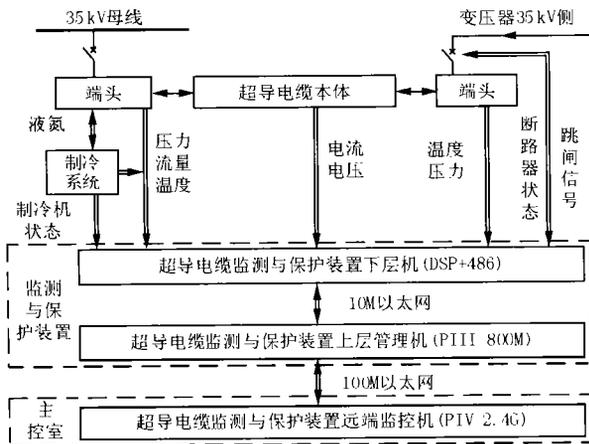


图 1 高温超导电缆系统结构图

Fig 1 Structure of HTS cable system

超导电缆本体通过端头与电力系统一次设备相连, 是传送电能的载体; 制冷系统为超导电缆提供所需的低温环境, 以使电缆维持在超导运行状态; 监测与保护系统采用分层式结构, 主要负责监测各个部分的参数和运行状态, 一旦超导电缆运行出现异常或发生故障, 及时发出告警或跳闸信号, 以保护超导电缆的运行安全。本文结合高温超导电缆监测与保护系统的研发实践, 重点介绍下层监测与保护单元

的功能特点、硬件结构和软件设计。

1 装置的功能设计与特点

由于高温超导电缆首次在我国电网中投入实际运行, 运行经验比较缺乏。因此, 在装置功能设计中, 除保护功能外, 还涵盖超导电缆运行状态的在线监测、运行数据记录与分析以及故障数据记录与分析等诸多方面。

1.1 保护方案设计

超导电缆正常运行的前提条件是处于超导状态, 这样才能传送预期的载流功率。一旦超导电缆发生失超, 将严重影响超导电缆的安全稳定运行。因此, 失超故障的检测与保护是超导电缆实用化过程中需要重点解决的关键技术问题之一^[3]。

超导电缆产生失超现象的机理复杂, 涉及因素多, 主要包括冷却系统故障、电缆本体故障以及电力系统短路电流等。鉴于超导电缆的温度、液氮压力、液氮流量等非电气量信号能够直观地反映超导电缆的运行状态, 因此, 传统的失超保护主要由上述非电气量构成^[4]。基于非电气量的失超检测方法在实用中存在的突出问题是, 非电气量信号变化较慢, 难以及时反映由短路电流引起的突发性失超, 如果短路电流的作用时间过长, 将严重危及超导电缆的安全运行。因此, 在保护方案设计中, 综合运用了电气量和非电气量失超检测方法。其中, 对于由于系统短路电流引起的电缆失超, 主要采用基于电气量的失超监测方法, 以充分发挥其检测速度快的优势。而对于制冷系统故障或电缆本体异常, 如漏热或液氮传输管道堵塞等引发的失超, 由于其发展速度相对较慢, 主要根据非电气量参数如温度、压力、流量等信号进行监测, 以提高检测的可靠性和准确性。

在具体保护方案实现中, 根据高温超导电缆电

基金项目: 863 计划资助项目 (2002AA306154)

流的大小,采用三层不同的保护策略。当超导电缆电流小于最小失超电流时,主要通过监测电缆两端的温度、温升、流量、压力和压力差的变化来进行保护;当电缆电流在最小失超电流和极限故障电流之间时,根据实时计算超导电缆内部的热积累来实现反时限过量保护;当电缆电流大于极限故障电流时,保护无延时跳闸。

上述综合保护方案可有效克服单纯基于非电气量的失超检测方法响应速度慢,难以对由于短路电流引发的失超故障进行有效保护的缺陷;对于严重短路故障,可实现超导电缆的快速切除;而在小故障电流情况下,可在确保超导电缆运行安全的前提下,避免超导电缆不必要的频繁切除,提高其供电可靠性。此外,所采用的失超检测方案主要利用超导电缆的端口特性进行,可简化传感器的个数,安装方便,漏热小,便于工程应用。

1.2 运行状态在线监测与数据记录

由于本次高温超导电缆并网试运行作为国内首次,对电缆运行状态进行全面的在线监测和记录非常重要。因此,除保护功能外,监测与保护装置还提供全面、完整的运行状态监测和数据记录功能。

超导电缆运行参数的在线监测主要包括超导电缆三相交流电流、电压的有效值和相位、各序分量的有效值和相位、传送的有功功率和无功功率;超导电缆各相冷却液氮管的流量、进/出口温度及温升、进/出口压力及压力差以及冷却系统各类异常和故障告警信号等。

除运行参数的在线监测外,超导电缆的实际运行数据同时进行记录保存,以便为超导电缆的运行特性分析提供必要的基础信息,同时为未来超导电缆的工业化运行积累实际运行经验。运行数据记录包括所有的模拟量通道信息和开关量状态信息。由于运行数据需长时间连续记录,鉴于正常运行时,各参数的变化相对较慢,为减少记录数据量,同时保证记录信息的完整性,交流电气量信号采用实、虚部记录方式,非电气量信号按一工频周期的平均值方式记录。此外,为了更好地掌握超导电缆的总体运行情况,装置还提供重要参数的累积记录与监测功能,包括超导电缆运行时的进、出口温度、流量、压力、电流等的分档累积运行时间;制冷系统累积运行时间以及超导电缆保护累计动作次数等。

1.3 故障数据记录

当超导电缆出现故障导致电缆切除时,装置将自动记录切除前后各信号的故障数据,形成故障报

告。此外,为了全面了解电网发生故障后超导电缆的运行参数变化情况,除故障报告外,对于未引发超导电缆跳闸的外部短路故障,装置也记录相应的故障数据,作为启动报告保存。

传统的微机保护由于受存储容量的限制,故障报告主要记录故障及跳闸前后暂态波形数据,记录时间相对较短。对于高温超导电缆,为了全面了解故障后,特别是短路故障后电缆本身的运行参数,如温度、压力、流量等的变化过程,其故障和启动报告的记录方式借鉴了故障录波装置的应用经验,并进行了适当扩展。在装置设计中,采用了如图2所示的分段记录方式。

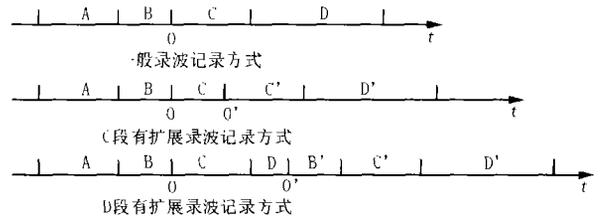


图2 故障录波分段记录方式

Fig 2 Format of fault section recording

其中A段为故障前的稳态数据,采用实虚部记录方式,每工频周期记录一次。记录时间最长可整定为10s。B段为故障前采样值数据,最长不大于0.5s;C段为故障后暂态采样数据,最长不大于5s;D段为故障后的稳态数据,记录方式与A段相同,最长记录时间为300s。此外,当C段末端电气量发生突变或开关跳闸,自动扩展一个C段。若在D段内电气量发生突变或开关跳闸,则重新按B、C、D段方式记录。上述记录方式故障信息记录完整、全面,可为超导电缆在故障情况下的运行特性分析和保护动作行为分析提供重要的基础信息。

2 硬件基本结构和特点

由于高温超导电缆监测与保护系统集保护、运行状态在线监测、正常与故障数据记录为一体,功能丰富,数据处理和存储量大,对硬件资源提出了新的更高要求。根据其应用特点,下层机单元采用了双CPU并行工作模式,并按微机保护的高可靠性要求进行规划设计。其基本硬件结构如图3所示。装置为6U、19英寸标准机箱,采用背插式结构,以利于强、弱电分离,提高其抗干扰性能。各模板插件通过欧式穿孔连接器与无源母板插接,以消除传统边缘金手指连接方式抗冲击和震动能力差,连接可靠性低的弊端。

超导电缆的各交流电压、电流信号通过交流插件中的高精度隔离变换器进行隔离变换。非电气量信号,如压力、温度、流量等,就地转换成 4~20 mA 电流信号接入下层机,并通过直流插件中的隔离放大器进行隔离测量。

在双 CPU 并行工作模式下,所有模拟量信号和开关量信号经过隔离变换后接入 DSP 板,由其完成模数变换和各类基本参数计算,以充分发挥其计算优势。采样数据和计算参数通过双口 RAM 方式提交给 486 板。该板采用 486DX-100CPU, 32 M 内存,集成了以太网接口、电子盘、EEPROM、看门狗等。主要完成保护逻辑判断、异常告警和故障跳闸开出控制、记录数据的存储管理以及与上层管理机的数据通信等。

下层机单元自行构成一独立系统,与上层管理机之间仅通过通信接口互连。这种分层结构形式,有助于提高下层机单元的抗干扰性能,且上层机或通信链路的故障不影响下层机的正常工作,提高了系统运行的可靠性。

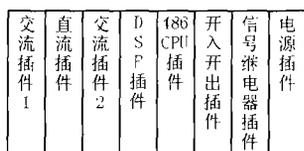


图 3 下层机结构图

Fig 3 Structure of under-unit device

3 主要软件算法及流程

3.1 主要软件算法

在运行状态在线监测中,交流工频电量采用全周傅氏算法进行计算,以提高计算精度。以电流信号为例,其工频分量的实部为:

$$I_k = \frac{2}{N} \sum_{k=1}^N i_k \cos k \frac{2}{N} \quad (1)$$

虚部为:

$$I_l = -\frac{2}{N} \sum_{k=1}^N i_k \sin k \frac{2}{N} \quad (2)$$

式中: N 为每工频周期采样点数。

对于非电气量信号,由于其变化较为缓慢,为了提高检测精度,减少干扰信号的影响,除了在硬件电路上采用低通滤波器进行预处理外,在软件算法上,非电气量信号按一工频周期的平均值进行计算。

在短路电流引起的失超故障检测算法中,由于涉及短路电流引起的超导电缆发热计算,故短路电流计算采用了“真有效值”算法,以计及非周期分量

和高次谐波分量产生的热效应。短路电流“真有效值”算法为:

$$I = \sqrt{\frac{\sum_{h=1}^N i_h^2}{N}} \quad (3)$$

其中: I 为电流有效值; N 为每周波采样点数; i_h 为电流采样值。

在分层式保护方案中,当电缆电流大于失超电流而小于极限故障电流时,通过实时计算超导电缆内部的热积累来实现反时限过量保护。其动作判据为:

$$\int_{t_{im e 0}}^{t_{im e 1}} i^2(t) dt > Q_{set} \quad (4)$$

其离散计算方程为:

$$Q = \sum_{n=0}^M i_n^2 Q_{set} \quad (5)$$

其中: Q_{set} 为热积累量综合定值,由超导电缆结构参数、材料特性、最大允许温升以及采样周期等综合确定。 i_n 为每周波电流真有效值, M 为满足累积条件后累积的周波数。

3.2 软件基本流程和特点

下层机软件包括 DSP 板软件和 486 板软件两部分,均以 C 作为主要开发语言,对实时计算要求较高的部份,采用嵌入式汇编语言编程,以便于软件开发、调试和维护。DSP 板侧重于信号的 AD 采集和基本参数计算,其基本程序流程见图 4。其中, DSP 自检主要包括程序自检、双口 RAM 自检以及定值自检等。一旦自检出错,通过双口 RAM 通知 486 板,闭锁保护,防止误跳。同时给出装置故障报警信号,提醒运行人员处理。若上电自检正常,则开放定时采样中断,并在主程序中循环查询 486 板通过双口 RAM 传送的运行监控命令,完成相关操作。运行监控命令主要包括定值修改和定值上传等。

由于装置接入的模拟量通道数多,参数计算量大,在 DSP 板的定时采样中断程序设计中,参数计算采用了分时计算的模式,同时,AD 转换采用了中断嵌套式设计方法,使 AD 转换与参数计算可并行进行,以提高计算效率。此外,由于双口 RAM 的存取存在总线竞争的风险,为避免 486 和 DSP 板对同一数据区同时进行读写,双口 RAM 的数据区分为两块,当 DSP 对其中一块数据区进行写操作时,486 从另一块数据区读取数据。每次采样中断,自动进行数据区切换。

486 板主要完成保护逻辑判断、记录数据的存储管理以及与上层管理机的数据通信等,基本程序

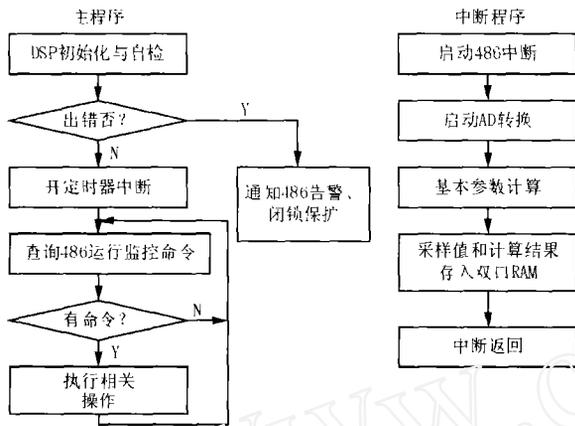


图 4 DSP程序流程图

Fig 4 Flow chart of the DSP program

流程如图 5 所示。其定时中断由 DSP 板提供的外部中断信号触发。进入定时中断后,首先从双口 RAM 中读取由 DSP 板传送的采样数据和计算参数,并保存于缓冲区。当装置位于运行状态时,开放所有的保护功能。若检测出超导电缆运行出现异常,给出异常告警信号,并进行事件记录,包括事件发生的时间、类型、当前测量结果以及异常告警定值等。若超导电缆发生故障,满足保护动作判据,则给出跳闸信号,切除电缆,同时进行故障数据记录。由于故障数据记录量大,在软件设计中,采用了实模式下高端内存直接访问技术。在定时中断中,录波数据首先缓存至高端内存,在主程序中完成录波数据的备份存盘管理以及与上层机的记录数据的通信。此外,在定时中断程序中,自动连续记录超导电缆“稳态”运行数据,并缓存于高端内存。在主程序中,定时将稳态运行数据通过以太网传送给上层机保存。

4 结论

高温超导电缆监测与保护系统集成保护、运行状态在线监测、运行数据和故障数据记录等多项功能。其下层机硬件设计借鉴了微机保护和录波装置的研发经验,资源丰富,运行稳定可靠。在软件设计中,采用了基于电缆电流大小的分层式保护策略,可有效克服单纯基于非电气量的失超检测方法响应速度慢,难以对由于短路电流引发的失超故障进行有效保护的缺陷,便于工程应用。功能丰富的运行状态监测与数据记录功能可为超导电缆的运行特性分析提供重要的基础信息,为未来超导电缆的工业化运行积累经验。2004年7月,该系统已在现场正式投入运行,取得了良好的运行效果。

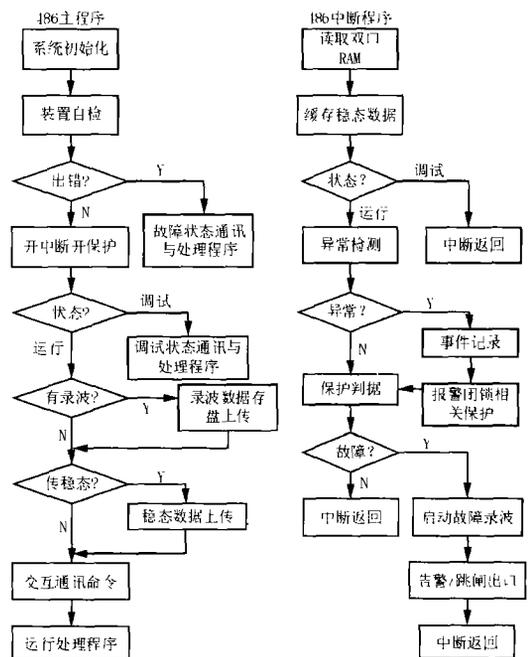


图 5 486程序流程图

Fig 5 Flow chart of the 486 CPU program

参考文献:

- [1] 信赢,侯波. 21世纪电力传输新材料高温超导电缆综述与展望[J]. 电线电缆, 2004, 1: 3-9.
XN Ying, HOU Ba. General Introduction and Forecast of High Temperature Superconductive Cable—a New Medium for Power Transmission in 21 Century[J]. Electric Wire & Cable Feb, 2004, 1: 3-9.
- [2] Beales T P. High Temperature Superconducting Power Cables[J]. IEE Colloquium on Practical Applications of High Temperature Superconductors, 1995, 4(5).
- [3] 唐跃进,李敬东,程时杰,等. 发展超导电力科学技术的关键及主要研究课题[J]. 电力系统自动化, 2001, 25(9): 66-69.
TANG Yue-jin, LI Jing-dong, CHENG Shi-jie, et al. Keys to Applying Superconducting Technique to Electric Power Systems[J]. Automation of Electric Power Systems, 2001, 25(9): 66-69.
- [4] 喻小艳,李敬东,唐跃进. 超导电力装置失超检测的基础研究[J]. 中国工程科学, 2003, 5(10): 73-77.
YU Xiao-yan, LI Jing-dong, TANG Yue-jing. The Basic Study for Quench Detection in Superconducting Electric Equipments[J]. Engineering Science, 2003, 5(10): 73-77.

收稿日期: 2004-09-27; 修回日期: 2004-12-24

(下转第 62 页 continued on page 62)

- [2] 刘健,赵海鸣. 继电保护整定计算及定值仿真系统[J]. 继电器, 2002, 30(9): 47-49.
L U Jian, ZHAO Hai-ming. System of Setting Calculation and Simulation of Relay Protection[J]. Relay, 2002, 30(9): 47-49.
- [3] 吕飞鹏,李华强,张军文,等. 110~500 kV 电网继电保护整定计算专家系统研究[J]. 继电器, 2000, 28(3): 29-32
L ü Fei-peng, L I Hua-qiang, ZHANG Jun-wen, et al. Studies on the Expert Systems for Setting and Coordinating Protective Relaying in 110~500 kV Power Networks[J]. Relay, 2000, 28(3): 29-32.
- [4] 陈湘波,冯林桥,刘飞,等. 短路计算与继电保护整定图示一体化软件[J]. 电力自动化设备, 2003, 23(11): 47-48
CHEN Xiang-bo, FENG Lin-qiao, L U Fei, et al. Graphic and Integrative Program for Fault Analysis and Protection Setting[J]. Electric Power Automation Equipment, 2003, 23(11): 47-48.
- [5] Cooper A. 软件开发的创新思维[M]. 北京:电子工业出版社, 2003.
Cooper A. Creative Thought of Software Development [M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2003.

收稿日期: 2004-09-27; 修回日期: 2004-12-03

作者简介:

王慧芳(1974-),女,博士研究生,讲师,从事电力系统继电保护以及软件工程研究; E-mail: huifangwang@163.com
何奔腾(1959-),男,教授,博士生导师,主要从事电力系统继电保护和控制研究。

Interaction design of setting calculation software in relay protection

WANG Hui-fang, HE Ben-teng

(School of Electrical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China)

Abstract: In order to improve the practicality of power system application software, interaction design is put forward. The interaction design includes conception design, action design and interface design. And its process contains role design, object design, assignment design and humanism design. Some problems should be pay attention are also expounded. The engineering application has testified that using interaction design method properly can effectively improve software practicality, save time and software cost, and ensure development successfully.

Key words: relay protection; setting calculation; interaction design; software engineering

(上接第 58 页 continued from page 58)

作者简介:

蔡磊(1980-),男,硕士研究生,研究方向为微机控制与保护; E-mail: cai_ddd@sina.com

张哲(1962-),男,教授,从事电力系统自动化等相

关研究工作;

张勇刚(1978-),男,硕士研究生,研究方向为微机控制与保护。

Developing the under-unit of the HTS cable monitoring and protection device

CA I Lei, ZHANG Zhe, ZHANG Yong-gang, YANG Jun

(Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

Abstract: High temperature superconducting (HTS) cable monitoring and protection device integrates with several functions of monitoring, protection and fault recording. The device is composed of two units. This paper details the functional characteristic, hardware structure, basic protection scheme and relevant algorithms of under unit monitoring and protection unit. The basic flow chart of software is introduced systematically as well. The device is running well as expected in Puji transformer substation.

Key words: HTS cable; quench protection; relay protection; data recording