

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.230218

基于控保信号序列化和力引导算法的高压直流故障 智能诊断可视化技术研究

叶艳军¹, 陈水耀², 潘武略², 詹庆才¹

(1. 北京四方继保自动化股份有限公司, 北京 100085; 2. 国网浙江省电力公司, 浙江 杭州 310007)

摘要: 针对高压直流输电系统故障信号繁多分散难以直观查看故障过程、关键信息, 以及录波波形不标注关键变化时刻、不能显示波形文件外重要保护事件的问题, 提出了基于状态分组的控保信号序列化技术和基于力引导算法的波形事件标签智能加载技术。首先, 利用基于状态分组的直流控保信号序列化技术提取最重要的直流控保信号, 根据信号变化确定系统状态, 按系统状态对信号分组并概括描述, 将高压直流故障过程中一、二次设备变化情况以可视化的动作时序图形式展示。同时, 利用基于力引导算法的波形事件标签智能加载技术对开关量变位及保护事件信息展示为图形化标签, 并在相关波形通道曲线上基于时间轴同步标示的方法, 将基于录波和相关事件的故障分析过程可视化简明展示。最后, 在国调中心、浙江省调、江苏省调和南网总调等实际工程现场推广应用, 结果表明所提技术方案可方便调度运行和保护专业人员快速了解故障情况, 提升高压直流故障处理效率。

关键词: 高压直流; 控保信号序列化; 力引导算法; 故障诊断可视化

Intelligent diagnosis and visualization technology for high voltage DC faults based on control and protection signal serialization and a force guidance algorithm

YE Yanjun¹, CHEN Shuiyao², PAN Wulue², ZHAN Qingcai¹

(1. Beijing Sifang Automation Co., Ltd., Beijing 100085, China; 2. State Grid Zhejiang Electric Power Corporation, Hangzhou 310007, China)

Abstract: There are numerous and scattered fault signals in the HVDC transmission system, making it difficult to visually view the fault process and key information. There is also an inability to display important protection events outside the waveform file without marking the critical change time in the waveform. In response to these problems, a control signal serialization technology based on state grouping and an intelligent loading technology for waveform event labels based on force guided algorithm are proposed. First, using the serialization technology of HVDC control and protection signals based on state grouping, the most important HVDC control and protection signals are extracted. The system state is determined based on the signal changes, and the signals are grouped and summarized according to the system state. The changes in the primary and secondary equipment of the system during the HVDC fault process are presented in a visual action sequence diagram. At the same time, waveform event label intelligent loading technology based on force guided algorithm is used to display the switch displacement and protection event information as graphical labels. The fault analysis process based on waveform recording and related events is visualized and concisely displayed on the relevant waveform channel curve using the method of synchronous labeling on the time axis. Finally, the proposed technical solution is applied in practical engineering sites such as the National Dispatch Center, Zhejiang Dispatch, Jiangsu Dispatch, and Southern Power Grid General Dispatch. The results show that the proposed technical solution is convenient for scheduling, operation, and protection professionals to quickly understand the fault situation, improving the efficiency of HVDC fault handling.

This work is supported by the National Key Research and Development Program of China (No. 2021YFB2401000).

Key words: HVDC; SER signal serialization; force guidance algorithm; fault diagnosis visualization

基金项目: 国家重点研发计划项目资助 (2021YFB2401000)

0 引言

我国能源资源分布与用电负荷需求极不均衡,处于“源荷割离”状态^[1-2]。为合理配置资源、优化能源结构,实现碳达峰、碳中和的目标,高压直流输电技术以其输送容量大、输电距离远、线路损耗低的优势被广泛应用于输电工程中^[3-6]。但是,直流系统构成复杂,直流线路分布区域广泛且运行环境极易受自然灾害和气候因素影响^[7-11]。此外,交直流并行系统兼具交流、直流输电的优点,但两者间的相互作用更为复杂^[12-13]。因此,高压直流系统出现故障的概率较大,且故障不能被快速巡查,影响系统的安全稳定运行^[14-16]。

2021年前,现有系统都只具备交流二次设备(保护和录波装置)的运行情况监视和故障分析功能,不具备高压直流监视、故障智能诊断以及可视化展示功能。文献[1]设计并研发了一套高压直流监视与故障诊断主站系统,当发生故障时可以快速获取直流系统运行工况变化、直流控制保护动作信息以及故障过程记录,并对故障进行快速准确分析和诊断,为电网事故处理提供有效的辅助决策,重点解决了高压直流故障难以远程诊断的问题,相关软件成果推广应用为国调中心和浙江省调等现场,但并没有对高压直流故障可视化展示技术进行深入研究。文献[17]分析了当前交流保信主站系统存在的问题,提出了新一代交流保信主站的设计原则,着重阐述了其软件结构设计、硬件结构设计、数据库设计和应用功能设计。文献[18]针对云南省保山电网的保山变、朝阳变、腾冲变、黄龙变、施甸变和昌宁变6个220 kV变电站存在的运行问题,指出建立交流保信系统的必要性,对保山电网故障信息系统的体系结构进行总体设计,并建立了分布式异构系统。文献[19]以当前新疆电网继电保护故障信息系统的研究和分析为基础,针对新疆电网实际情况,提出了新疆电网继电保护故障信息系统改造及高级应用功能设计方案,并阐述了其关键技术及实现方式。文献[20]基于交流保信系统的继电保护状态评价系统给出了一种电网二次设备状态检修的应用方案,包括实现可行性、评价规则、实现方法、流程、预警机制及实际应用情况等方面。通过分析交流保信系统中用于评价保护状态的信息数据类型,研究继电保护状态评价方法和预警机制,给出了基于保信系统的继电保护状态评价完整设计方案,实现了从数据读取、数据分析、状态分析到预

警报告的全流程管理。综上所述,现有系统至少还存在以下两类问题:

1) 现有直流故障分析应用只是把高压直流系统故障相关的信号事件顺序记录(sequence events record, SER)、故障录波分析结果等相关数据,按照信号源设备分组,再按时间顺序统一罗列成表,多以表格和文字方式展示。而由于信号较多,动作时序图无法完全展示,也无法显示完整的故障过程,用户无法快速了解故障过程全貌和关键的变化过程。

2) 现有录波分析查看工具一般只列出各录波采样通道名称,对于各采样值在具体时刻的变化并不标注,而且也没有显示保护事件信号(非录波采样通道而是换流站上送的保护信号),不方便对比查看,工作效率低。

针对上述问题,本文先阐述总体解决思路,然后提出基于状态分组的直流控保信号序列化技术,即通过对直流控保信号分级和去除冗余,只提取最重要信号,由信号变化确定系统状态,按系统状态对信号分组并概括描述,将高压直流故障过程中的一、二次设备变化情况以可视化的动作时序图形式展示。同时,还提出基于力引导算法的波形事件标签智能加载技术,即通过对开关量变位及保护事件信息展示为图形化标签,并在相关波形通道曲线上基于时间轴同步标示的方法,将基于录波和相关事件的故障分析过程可视化简明展示。最后,在国调中心、浙江省调、江苏省调和南网总调等实际工程现场推广应用,结果表明所提技术方案的可行性。

1 软件架构

本文提出的高压直流故障智能诊断可视化技术,基于文献[1]中高压直流监视与故障诊断主站系统,在故障关键信息提取、整合及可视化人机界面展示方面进行了扩展和提升。文献[1]建立了高压直流运行信息获取和处理架构,研究了基于直流故障诊断专家知识库的高压直流输电系统故障辨识技术。本文软件架构如图1所示,采用分层设计,分为支撑平台层、通信交互层、业务数据处理层和人机界面展示层,各层实现不同的数据业务和应用功能。

特别地,本文提出的基于状态分组的控保信号序列化技术和基于力引导算法的波形事件标签智能加载技术均为实现和优化人机展示层的功能,即分别应用在直流系统故障报告和直流控保设备在线监视模块中。

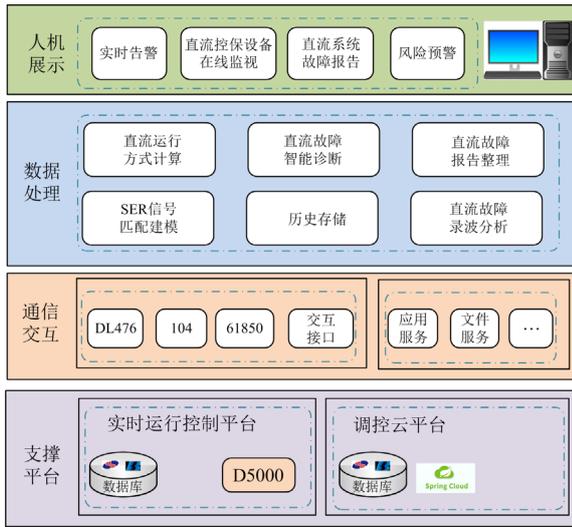


图 1 软件架构

Fig. 1 Software architecture

2 关键技术

2.1 基于状态分组的控保信号序列化技术

当高压直流故障时会产生很多信号，不方便用户快速掌握故障变化过程和关键的控制保护动作情况。针对这个问题，本文提出基于状态分组的控保信号序列化技术，即先对控信号进行分组，确定故障发展过程的各关键阶段及其对应的重要信号，以“鱼骨图”方式直观展示。图 2 为高压直流控保信号序列化流程图，主要思路是归纳和定义系统状态，接收控保信号，经过分类分级和信号过滤，确定系统状态迁移之间的逻辑关系，然后在线提取关键信号动态创建分组，用规范准确的名称命名分组，最后绘制作时序图，直观展示整个故障过程。

1) 信号分类分级

对直流控保信号进行识别，根据信号重要程度进行分级：紧急、告警、轻微；根据信号性质及其产生的后果进行分类：保护类、连接类和普通类。

其中，保护类信号表示检测到系统出现故障，需要触发控制信号出口以改变系统状态；连接类信号为控制信号且其导致的后果是一次系统由不可用切换到可用；其他信号都归为普通类。普通类信号也改变一次系统的运行状态，例如：一次系统由“正常运行”转为“闭锁”。

2) 定义系统状态及迁移逻辑

按照高压直流系统的一次、二次系统的拓扑连接和系统运行情况，定义空闲、普通、连接、普通+保护和连接+保护 5 种状态，设定各种状态之间的状态迁移逻辑。

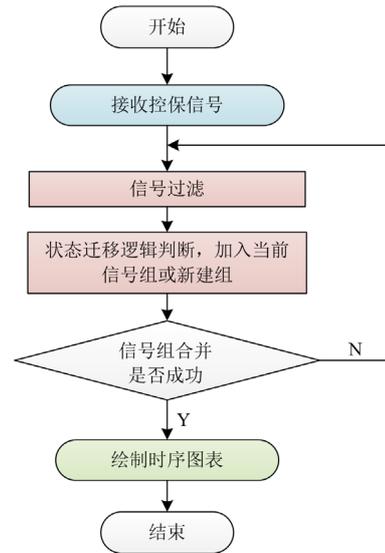


图 2 高压直流控保信号序列化流程图

Fig. 2 Flow chart of serialized processing of HVDC control and protection signal

系统状态包括：空闲、普通、连接、普通+保护、连接+保护，其说明见表 1。

表 1 系统状态定义

Table 1 System status definition

状态名称	说明
空闲	表示没有收到任何控制类信号。空闲状态有保护出口信号，不发生状态改变。
普通	有普通类信号动作，导致一次系统的运行状态改变。
连接	有连接类信号动作，导致一次系统的拓扑连接状态改变。
普通+保护	在普通状态有保护出口信号，进入普通+保护状态，一次系统无变化。
连接+保护	在连接状态有保护出口信号，进入连接+保护状态，一次系统无变化。

状态迁移逻辑如图 3 所示，举例说明故障事件顺序如下。

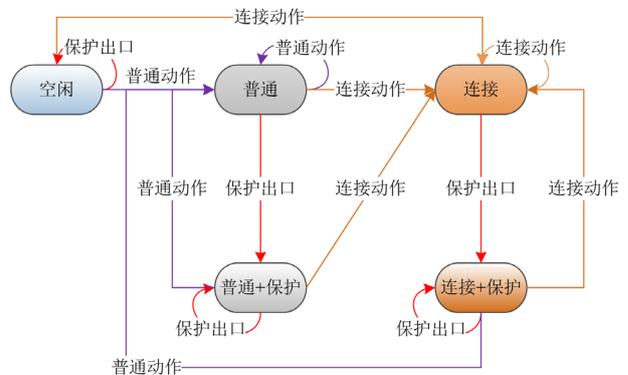


图 3 高压直流系统状态迁移逻辑示意图

Fig. 3 Logic diagram of state transition of HVDC system

- 信号 1: P1PPR1, C, 电压突变量保护动作;
- 信号 2: P1PPR1, B, 电压突变量保护动作;
- 信号 3: P1PPR1, C, 行波保护动作;
- 信号 4: P1PPR1, A, 行波保护动作;
- 信号 5: P1PPR1, A, 电压突变量保护动作;
- 信号 6: P1PPR1, B, 行波保护动作;
- 信号 7: P1PCP1, A, Order Down 命令出现;
- 信号 8: P1PCP1, B, Order Down 命令出现;
- 信号 9: P1PPR1, C, 低电压保护动作;
- 信号 10: P1PPR1, B, 低电压保护动作;
- 信号 11: P1PPR1, A, 低电压保护动作;
- 信号 12: P1CCP2, B, 阀组闭锁;
- 信号 13: P1CCP2, A, 阀组闭锁。

迁移过程如下:

- (1) 信号 1—6 的状态是“空闲”;
 - (2) 信号 7—8 出现, 状态迁移到“普通”, 同时信号 1—6 组成信号组;
 - (3) 信号 9—11 出现, 状态迁移到“普通+保护”;
 - (4) 信号 12—13 出现, 状态迁移到“普通”, 同时信号 7—11 组成信号组;
 - (5) 信号 12—13 组成信号组。
- 迁移逻辑描述如表 2 所示。

表 2 迁移逻辑描述

Table 2 Migration logic description

迁移前状态	信号动作	迁移后状态
空闲	普通类信号	普通
空闲	连接类信号	连接
空闲	保护类信号	不迁移
普通	普通类信号	不迁移
普通	连接类信号	连接
普通	保护类信号	普通+保护
连接	连接类信号	不迁移
连接	普通类信号	普通
连接	保护类信号	连接+保护
普通+保护	普通类信号	普通
普通+保护	连接类信号	连接
普通+保护	保护类信号	不迁移
连接+保护	普通类信号	普通
连接+保护	连接类信号	连接
连接+保护	保护类信号	不迁移

3) 状态及迁移逻辑判断

当直流系统发生故障时, 按照状态迁移逻辑判断故障报告中的直流控保信号归属的信号组; 利用信号组创建直流控保信号动作时序表; 其中, 故障报告中至少包括重要程度为紧急的直流控保信号。信号动作时序表用于在动作时序图上展示序号, 表

2 内每个信号都归属一个信号组。本方法通过归纳总结直流控保信号和高压直流系统状态之间的关系, 根据信号的类型、信号的出现顺序来判定高压直流系统进入何种状态, 并动态地创建信号分组。

4) 信号过滤

对于故障报告中的直流控制保护信号, 按照信号重要程度和冗余性检查进行过滤, 过滤后的信号作为待处理信号。

重要程度过滤是指只有直流控保信号重要程度为紧急的才进入下一步, 否则抛弃该信号; 冗余性检查是指对来自不同控制保护设备的同一性质直流控保信号进行合并, 即对冗余配置的多个设备的同一性质、同一时间或时间差小于预设阈值的信号, 只保留一个。

5) 信号组合并

按照系统状态迁移机制, 判断待处理信号是提取到当前信号组, 还是提取到新建信号组。

具体操作步骤如下。

Step1: 初始状态为空闲状态, 信号组号为 1。

Step2: 按时间顺序处理信号, 第一个信号进入 1 号信号组。

Step3: 对于第一个信号之后的信号, 如果是保护类信号, 则信号组号不变, 直到找到第一个普通类信号或连接类信号, 按照状态迁移逻辑, 此时状态迁移为普通状态或连接状态, 但信号组号仍为 1。当前状态为普通状态或连接状态, 按时间顺序处理信号, 如果是保护类信号, 此时状态迁移为“普通+保护”状态或“连接+保护”状态, 但组号不变; 如果是普通类信号或连接类信号, 则按状态迁移逻辑进行状态迁移, 若状态迁移则产生新的信号组, 即信号组号加 1, 否则组号不变。

Step4: 重复以上步骤直至处理完所有待处理信号后, 设定信号组名称。其中, 对于连接状态信号组, 以连接动作结果作为组名称; 对于普通状态信号组, 用信号的概括描述作为组名称。信号的概括描述预配置在 xml 文件中, 可按需配置。

Step5: 对于多于预设数量的信号组, 按照信号组合并规则进行合并。信号组合并规则为: 当信号组数量 m 大于信号组预设数量 n 时, 将排序为第一和第二的两个信号组进行合并; 合并后, 若信号组数量 $m-1$ 仍大于信号组预设数量 n , 则把排序为倒数第一的信号组合并到排序为第 n 的信号组; 迭代合并, 直到信号组数量小于等于信号组预设数量。

6) 绘制时序图表

把控保信号动作时序表的信号合并后在人机

界面以图表形式绘制并展示直流控制保护动作序列图。

直流控制保护动作序列图中最多展示合并后的 n 个信号组, 每个信号组中展示按照时间顺序排列的前 k 个信号, 其余信号通过弹出窗口展示, k 为展示信号预设数量。

2.2 基于力引导算法的波形事件标签智能加载技术

针对录波波形图上不标注关键变化的具体时刻, 也不能显示波形文件中没有包含的重要保护事件这个问题, 本文提出基于力引导算法的波形事件标签智能加载技术。其中力引导算法是一个图布局算法, 对网络型数据进行力学建模, 通过多次迭代计算, 得到一个稳定的布局^[21-23]。在电力系统中, 力引导算法被广泛应用于电力系统状态估计、最优潮流计算和电力市场竞争模型等方面, 本文是首次高压直流故障诊断系统中应用力引导算法。常见的力引导算法有 Fruchterman-Reingold 算法、Kamada-Kawai 算法、ForceAtlas2 算法、GEM 算法和 Circular Layout 算法^[24-25]。本文提出基于 Fruchterman-Reingold 算法的波形事件标签智能加载技术, 将同时刻及不同时刻的开关量变位和保护事件信息在录波图形中可视化展示为事件标签, 对标签线和标签条目等元素在时间轴单侧及两侧的标注, 采用力引导算法进行自动布局, 有效避免多个事件信息显示的相互遮挡和干扰, 并且保证了事件标签在录波图形周围的均匀分布, 通过定义不同的交叉能量系数, 可实现最合理事件标签自动布局。该方法流程如图 4 所示。

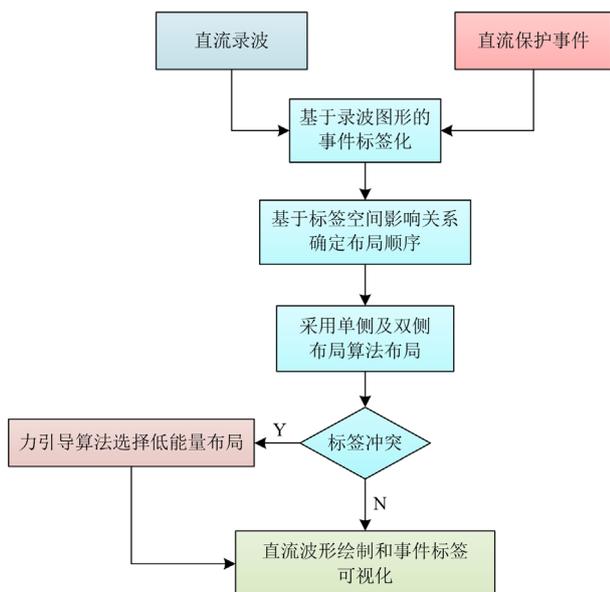


图 4 基于力引导算法的波形事件标签智能加载流程图

Fig. 4 Flow chart of waveform event label intelligent loading technology based on force guidance algorithm

1) 标签设计

将开关量变位信息或保护事件信息可视化展示为标签, 标签包括: 标签线和标签条目。如图 5 所示, 一个标签可以包括一个标签线和一个或多个标签条目, 当同一时刻仅有一个事件时, 一个标签仅包含一个标签条目, 当同一时刻有多个事件时, 一个标签包含多个标签条目, 同一标签的所有标签条目位于标签线的同侧, 即标签条目绘制于标签线的左侧或右侧。其中, 红虚线部分为标签条目, 区域包括文本框和水平连接线, 任何两个标签条目, 在空间上不能重叠; 红实线区域为标签线, 支持垂直方向伸缩。

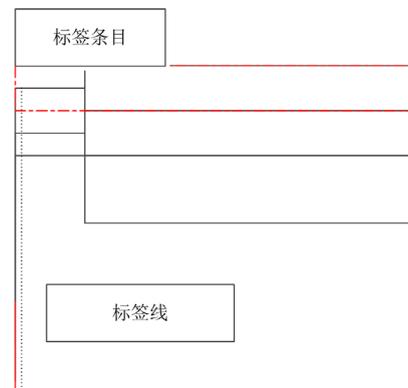


图 5 标签的绘制和组成示意图

Fig. 5 Schematic diagram of label drawing and composition

标签条目的信息来自于录波文件开关量通道中的变位信息、录波故障报告头文件中的事件信息或外部的信息。相比于其他力引导算法, Fruchterman-Reingold 算法的优点是布局图形更加美观和易于理解, 有效避免节点重叠, 保证布局的可读性, 不足之处是需要大量的计算和内存空间。

2) 选择布局顺序

先放置的标签靠近波形中轴线, 后放置的通过调整 y 坐标, 实现标签间不遮挡。调整标签放置的布局先后顺序, 使得标签相互不影响。

以图 6 所示为例, 如果先放置标签 B, 后放置标签 A, 调整标签 A 的 y 坐标, 能实现不交叉; 如果先放置标签 A, 即更靠近波形中轴线, 后放置标签 B, 因为不能遮挡波形曲线区域, B 不能放置在 A 下面, 只能放置在 A 上侧, 则 B 的标签线和 A 交叉。

假设标签 N 的 x 轴区间是 $[N_1, N_2]$, 标签线位置 n , $N_1 \leq n \leq N_2$; 标签 M 的 x 轴区间是 $[M_1, M_2]$, 标签线位置 m , $M_1 \leq m \leq M_2$ 。规则说明如下。

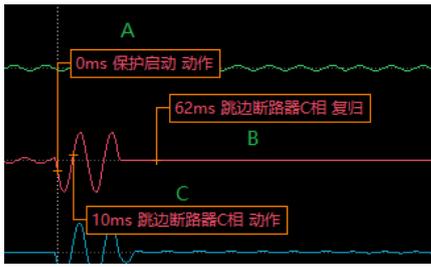


图 6 标签选择过程示意图

Fig. 6 Schematic diagram of label selection process

- (1) M 影响 N: 即 m 属于 $[N_1, N_2]$, $N_1 \leq m \leq N_2$ 。
 - (2) M 单向影响 N: 即 M 影响 N, 但 N 不影响 M。
 - (3) M、N 双向影响: 即 M 影响 N, N 影响 M。
- 标签布局顺序的选择过程如下。

Step1: 把未绘制的标签, 依据标签线的位置, 全部放入集合 L 和集合 R。

Step2: 如果集合 L 空, 则将集合 R 中的标签, 放入队列 C。

Step3: 如果集合 R 空, 则将集合 L 中的标签, 放入队列 D。

Step4: 如果集合 L 和集合 R 均不空, 若某标签不影响别的标签, 则从中移出, 放入队列 C; 其中, 影响是指该标签线的放置会遮挡到别的标签条目显示。

Step5: 选择集合 L 中采样序号最大的标签 l 和 R 中采样序号最小的标签 r , 如果 l 和 r 相互影响, 分别计算 l 和 r 影响到标签的数量, 数量大的标签放入队列 D; 如果 l 影响 r , r 不影响 l , 取出 l , 放入队列 D; 如果 r 影响 l , l 不影响 r , 取出 r , 放入队列 D。

Step6: 若集合 L 或 R 为空, 参照 Step2 或 Step3 处理, 否则返回 Step4。

最终得到 2 个队列 C 和 D, 其布局顺序为: 先顺序布局 D 中元素, 后逆序布置 C 中元素。

3) 单侧布局

若波形上侧或下侧无绘制空间, 将标签依次放置于波形中线的单侧。绘制时调整顺序, 先绘制所有标签的标签线。

图 7 为标签占用空间示意图。标签占用的空间是指标签条目占用的空间, 标签线对应的空间不算作标签占用的空间, 为了清晰, 矩形区间较大, 实际空间以文本矩形框、标签线为界。标签放置的主要步骤如下。

Step1: 新放置标签其占用空间不影响已放置的标签(不考虑标签线), 且为了清晰, 两个标签竖直方

向留小间隙, 放置时应尽量靠近波形曲线的中轴线。



图 7 标签占用空间示意图

Fig. 7 Schematic diagram of occupied space of label

Step2: 如图 8 所示, 计算当前标签的矩形区域, 加上间隙, 形成 2 个矩形 RA 和 RB, 从最靠近中轴线的位置, 向外测试能否放置, 即检查 RA 和 RB 是否有重叠。

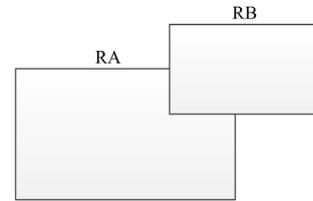


图 8 单侧放置标签方法示意图

Fig. 8 Schematic diagram of placing label on one side

Step3: 以图 8 为例, RB 从下向上移动, 检查是否影响 RA, 显然 RB 的合理位置是 RB 底部坐标大于 RA 的顶部坐标。

Step4: 对于其他标签 E、F、G、..., 分别计算合理位置。

4) 双侧布局

若波形上侧和下侧均有绘制空间, 将标签依次放置于波形中线的双侧。

标签放置的主要步骤如下。

Step1: 假定当前标签位置在中线上侧, 记录其位置, 统计受它影响的标签个数 Count1。

Step2: 假定当前标签位置在中线下侧, 记录其位置, 统计受它影响的标签个数 Count2。

Step3: 选择 Count1 和 Count2 值小对应的放置方式。

5) 标签冲突处理

当出现标签影响时, 调整标签的绘制顺序, 返回过程 2)。当调整绘制顺序时, 优先绘制标签线影响其他标签的标签。

6) 力引导算法布局

采用力引导算法自动选择最合理的布局方案。

(1) 如图 9 所示, 将标签线视作弹簧, 平衡位置位于波形区域外侧, 距中轴线 h , 设标签线长 z , 定

义标签位置能量公式 $k_1(z-h)^2$, k_1 为能量系数, 且 $z \geq h$ 。

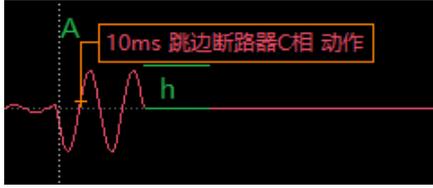


图 9 弹簧模型示意图

Fig. 9 Schematic diagram of spring model

(2) 标签间因相互影响、间隙太小则存在相互排斥的能量。标签条目仅能在竖直方向调整, 设标签 A: 宽为 w_A , 高为 h_A , 中心点坐标为 (x_A, y_A) , 标签 B: 宽为 w_B , 高为 h_B , 中心点坐标为 (x_B, y_B) , 当 $(w_A + w_B)/2 < |x_A + x_B|$ 时, 标签不会影响, 不存在斥力, 能量为 0。

(3) 当 $(w_A + w_B)/2 \geq |x_A - x_B|$ 且 $|y_A - y_B| < c + (h_A + h_B)/2$, 其中, c 为间隙。这时存在排斥能量, 调整 y 坐标满足此能量为 0。该能量定义为一个常数 K_2 , 远大于所有可能位置的能量, 它用于保证标签条目之间不影响, 且留有间隙, 如图 10 所示。

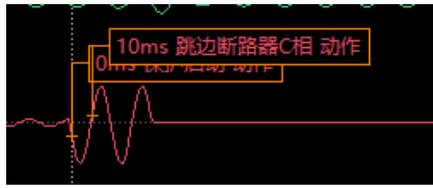


图 10 标签条目影响时能量计算示意图

Fig. 10 Schematic diagram of calculation when label items are affected

(4) 如图 11 所示, 当标签线和标签条目交叉时, 定义这个交叉存在能量, 每个交叉的能量为 K_3 , 满足 $K_2 \gg K_3 \gg K_1(x-h)^2$, 交叉能量保证标签线和标签条目尽量不交叉。

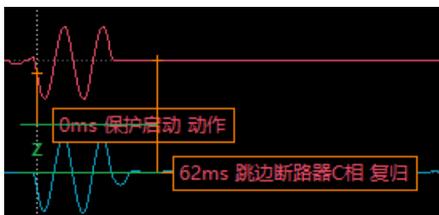


图 11 标签线和标签条目交叉时能量计算示意图

Fig. 11 Schematic diagram of calculation when label line and label item cross

3 实际效果

本文设计和研发的高压直流故障智能诊断主站

可视化软件已成功应用于国调中心、浙江省调、江苏省调和南网总调等现场应用情况。该可视化软件共包括两项关键技术, 第一项技术是基于状态分组的控保信号序列化技术, 即以“时序鱼骨图”方式直观展示高压直流故障全过程关键信息, 提升故障信息可视化效果。通过对高压直流故障过程中的一、二次系统的变化情况进行分组, 即对故障过程进行阶段划分, 各阶段还可以根据配置灵活调整, 更好地满足故障处理的需要。

在动作时序图上分组标出了故障发生后的主要阶段, 在鱼骨图的每根鱼刺上, 只列出最重要的几个信号, 更多信号可通过右键点击查看。图 12 为某次高压直流故障的部分动作时序图。



图 12 高压直流故障动作时序图

Fig. 12 Sequence diagram of HVDC fault action

第二项技术是基于力引导算法的波形事件标签智能加载技术, 即按故障组织相关信息, 用力引导算法合理布局标签, 且标签可以根据需要进行显示或隐藏。事件标签以及对应波形如图 13 所示, 主要信息如下。

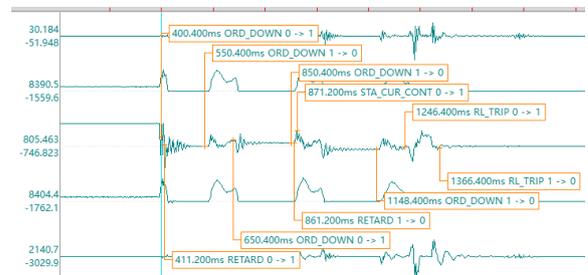


图 13 录波图形和事件标签自动布局(显示标签)

Fig. 13 Automatic layout of oscillogram and event label (display label)

- 1) 在 400.400 ms 时刻 ORD_DOWN 信号出现。
- 2) 在 411.200 ms 时刻 RETARD 信号出现。
- 3) 在 550.400 ms 时刻 ORD_DOWN 命令信号消失。
- 4) 在 650.400 ms 时刻 ORD_DOWN 信号出现, 此时直流线路故障未消除, 开始第二次移相放电过程。

4 结语

根据国调中心、浙江省调、江苏省调和南网总

调等现场实际应用情况表明,本文提出的高压直流故障智能诊断主站可视化关键技术,提高了调度运行人员了解和处理直流系统故障的效率,有效解决高压直流输电系统故障信号繁多分散、难以直观查看故障过程和关键信息的问题,得出以下结论。

提出基于状态分组的控保信号序列化技术,即通过对直流控保信号分级和去除冗余,只提取最重要信号,并通过由信号变化确定系统状态,按系统状态对信号分组并概括描述,将高压直流故障过程中一、二次设备变化情况以可视化的动作时序图形式展示,方便调度运行和保护专业人员快速了解故障的总体变化过程。

提出基于力引导算法的波形事件标签智能加载技术,即通过对开关量变位及保护事件信息展示为图形化标签,并在相关波形通道曲线上基于时间轴同步展示的方法,将基于录波和相关事件的故障分析过程可视化简明展示。同时,基于力引导算法定义不同的交叉能量系数,使得在多种标签选择和布局方法中自动选择一种最合理和没有损失的布局进行展示,进一步方便了故障分析人员的查看,免去了人工比对波形变化、相关事件的时标及数据信息的麻烦,明显提升了高压直流事故波形分析效率。

此外,上述两项关键子技术的实现思路也可推广应用至交流保护信息管理主站系统或二次设备在线监视与分析系统中。同时,为了更准确分析和展示高压直流故障信息,后续还应结合系统拓扑图深入研究。

参考文献

- [1] 王立鼎,詹庆才,张道农,等. 高压直流监视与故障诊断主站系统的研发与应用[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(10): 135-142.
WANG Liding, ZHAN Qingcai, ZHANG Daonong, et al. Research and application of HVDC monitoring and fault diagnosis master station system[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(10): 135-142.
- [2] 杨林超,应超楠,徐政,等. 大规模交直流互联电网RTDS快速建模方法[J]. 电力自动化设备, 2019, 39(9): 192-198.
YANG Linchao, YING Chaonan, XU Zheng, et al. Rapid RTDS modeling method of large-scale AC/DC hybrid power grid[J]. Electric Power Automation Equipment, 2019, 39(9): 192-198.
- [3] 李晓栋,徐政,胡四全,等. 3种混合直流输电系统的交流故障特性对比[J]. 电力自动化设备, 2019, 39(9): 228-234.
LI Xiaodong, XU Zheng, HU Siqian, et al. Comparison of AC fault characteristics among three types of hybrid HVDC system[J]. Electric Power Automation Equipment, 2019, 39(9): 228-234.
- [4] 徐政,肖晃庆,张哲任,等. 柔性直流输电系统[M]. 2版. 北京:机械工业出版社,2016.
- [5] 袁博,王颖,邵华,等. 抑制特高压直流系统连续换相失败的非线性动态电流偏差控制[J]. 中国电力, 2021, 54(8): 75-82.
YUAN Bo, WANG Ying, SHAO Hua, et al. A nonlinear dynamic current deviation control method for suppressing continuous commutation failures in UHVDC systems[J]. Electric Power, 2021, 54(8): 75-82.
- [6] 杨景刚,刘洋,苏伟,等. 苏州同里±10 kV 柔性直流配电系统直流故障特性研究[J]. 电力工程技术, 2021, 40(6): 113-120.
YANG Jinggang, LIU Yang, SU Wei, et al. Grounding fault on DC side of Suzhou Tongli ±10 kV flexible DC distribution system[J]. Electric Power Engineering Technology, 2021, 40(6): 113-120.
- [7] ZHAO Yangqu, ZHUO Ran, ZHANG Jincai, et al. Investigation of nonlinear PI multi-loop control strategy for aircraft HVDC generator system with wound rotor synchronous machine[J]. CES Transactions on Electrical Machines and Systems, 2023, 7(1).
- [8] LI Tao, LI Yong, ZHU Yuchen. Research on the voltage supporting capability of multi-VSC-HVDC subsystems operation strategy to receiving-end LCC-HVDC network in weak AC grid[J]. CES Transactions on Electrical Machines and Systems, 2023, 7(1).
- [9] LIU Yang, LIN Zehui, XU Chenying, et al. Fault ride-through hybrid controller for MMC-HVDC transmission system via switching control units based on bang-bang funnel controller[J]. Journal of Modern Power Systems and Clean Energy, 2023, 11(2): 599-610.
- [10] YE Chengjin, GUO Libang, DING Yi, et al. Reliability assessment of interconnected power systems with HVDC links considering frequency regulation process[J]. Journal of Modern Power Systems and Clean Energy, 2023, 11(2): 662-673.
- [11] MUNIAPPAN M. A comprehensive review of DC fault protection methods in HVDC transmission systems[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2021, 6(1): 1-20.
- [12] 李欢,傅闯,辛清明,等. 高压直流输电系统直流谐波阻抗的解析计算及谐振分析研究[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(19): 67-79.
LI Huan, FU Chuang, XIN Qingming, et al. Analytical calculation of DC harmonic impedance and DC resonance

- analysis of an HVDC transmission system[J], Power System Protection and Control, 2022, 50(19): 67-79.
- [13] 王顺亮, 谢洋, 马俊鹏, 等. 基于直流电流控制的特高压直流分层接入系统协调控制策略[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(19): 167-178.
WANG Shunliang, XIE Yang, MA Junpeng, et al. Coordinated control strategy for a UHVDC hierarchical connection system based on DC current control[J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(19): 167-178.
- [14] 雷朝煜, 郝良收, 戴甲水, 等. 高压直流输电线路故障定位研究综述[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(11): 178-187.
LEI Zhaoyu, HAO Liangshou, DAI Jiashui, et al. A review of fault location methods in HVDC transmission lines[J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(11): 178-187.
- [15] 张伟晨, 熊永新, 李程昊, 等. 基于改进 VDCOL 的多馈入直流系统连续换相失败抑制及协调恢复[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(13): 63-72.
ZHANG Weichen, XIONG Yongxin, LI Chenghao, et al. Continuous commutation failure suppression and coordinated recovery of multi-infeed DC system based on improved VDCOL[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(13): 63-72.
- [16] 李欣悦, 李凤婷, 尹纯亚, 等. 直流双极闭锁故障下送端系统暂态过电压计算方法[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(1): 1-8.
LI Xinyue, LI Fengting, YIN Chunya, et al. Transient overvoltage calculation method of HVDC sending-end system under DC bipolar blocking[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(1): 1-8.
- [17] 祁忠, 笃竣, 张海宁, 等. 新一代继电保护及故障信息管理主站的设计与实现[J]. 江苏电机工程, 2014, 33(4): 8-12.
QI Zhong, DU Jun, ZHANG Haining, et al. Design and implementation of the new generation of relay protection and fault information management station[J]. Jiangsu Electrical Engineering, 2014, 33(4): 8-12.
- [18] 杨俊峰. 继电保护故障信息系统在保山电网的应用[D]. 昆明: 昆明理工大学, 2015.
- [19] 张炜, 南东亮, 常喜强, 等. 适应智能调度的继电保护故障信息系统高级应用研发[J]. 电气技术, 2016, 17(5): 91-95.
ZHANG Wei, NAN Dongliang, CHANG Xiqiang, et al. Development of realization of advanced application function for protective relaying fault information system adaptable to smart dispatch[J]. Electrical Engineering, 2016, 17(5): 91-95.
- [20] 王跃强, 廖华兴, 袁晓青, 等. 基于保信系统的继电保护状态评价系统的开发与应用[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(8): 134-139.
WANG Yueqiang, LIAO Huaxing, YUAN Xiaoqing, et al. Development and application of relay protection condition evaluation system based of fault information processing system[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(8): 134-139.
- [21] 水超, 陈涛, 李慧, 等. 基于力导向模型的网络图自动布局算法综述[J]. 计算机工程与科学, 2015, 37(3): 134-139.
SHUI Chao, CHEN Tao, LI Hui, et al. Survey on automatic network layouts based on force-directed model[J]. Computer Engineering & Science, 2015, 37(3): 134-139.
- [22] 陈力平, 何博, 王玲. 基于节点相似度的力引导改进算法[J]. 计算机应用, 2017, 37(增刊 2): 214-218, 224.
CHEN Liping, HE Bo, WANG Ling. Improved forced-directed algorithm based on vertex similarity[J]. Journal of Computer Applications, 2017, 37(S2): 214-218, 224.
- [23] 李志刚, 陈谊, 张鑫跃, 等. 一种基于力导向布局的层次结构可视化方法[J]. 计算机仿真, 2014, 31(3): 283-288.
LI Zhigang, CHEN Yi, ZHANG Xinyue, et al. Hierarchical structure visualization methods research[J]. Computer Simulation, 2014, 31(3): 283-288.
- [24] 朱作欣, 朱全胜, 蒋燕, 等. 一种新的电气信息伪地理图及其生成算法[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(14): 60-66.
ZHU Zuoxin, ZHU Quansheng, JIANG Yan, et al. A new electrical information pseudo-geographic map and its generation algorithm[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(14): 60-66.
- [25] 崔兆阳, 王雅娟, 晏平. 在电力数据网中利用快速力导向算法进行网络元素布局的研究[J]. 信息通信, 2018(11): 1-4.
CUI Zhaoyang, WANG Yajuan, YAN Ping. Research on network element layout in power data network by using force directed algorithm[J]. Information & Communications, 2018(11): 1-4.

收稿日期: 2023-03-05; 修回日期: 2023-05-21

作者简介:

叶艳军(1976—), 男, 硕士, 高级工程师, 主要从事继电保护运行管理工作; E-mail: yyanjun@sf-auto.com

詹庆才(1982—), 男, 通信作者, 硕士, 高级工程师, 研究方向为电力自动化软件开发与项目管理。E-mail: zhanqingcai@sf-auto.com

(编辑 张颖)