

DOI: 10.7667/PSPC151995

基于 IEC61850 的继电保护功能时序可视化研究与实现

陈德辉¹, 杨志宏¹, 高翔²

(1. 国电南瑞科技股份有限公司, 江苏 南京 211106; 2. 南京邮电大学, 江苏 南京 210003)

摘要: IEC61850 标准的应用推动了继电保护信息可视化程度的提升。从实际需求出发, 探讨了在继电保护功能时序可视化中应用规范描述语言(Specification and Description Language, SDL)的可行性。提出了将各功能元件等效为不同状态, 将不同元件之间信息交互映射为可扩展有限状态机不同状态的转移, 并在此基础上采用 SDL 对目标系统进行建模。通过消息序列图动态展示各元件动作过程, 达到直观展示继电保护功能逻辑时序的目的。最后, 在实验室环境下构建了系统, 并初步可视化展示了距离保护动作时序。结果表明了该方法的可行性, 同时也针对信息模型、软硬件协同等问题进行了分析与讨论。

关键词: 智能变电站; 继电保护; 功能时序可视化; IEC61850; 规范描述语言; 可扩展的有限状态机

Research and implementation on function sequence visualization of relay protection based on IEC61850

CHEN Dehui¹, YANG Zhihong¹, GAO Xiang²

(1. NARI Technology Co., Ltd., Nanjing 211106, China; 2. Nanjing University of Posts and Telecommunications, Nanjing 210003, China)

Abstract: The application of IEC61850 promotes relay protection information visualization. The feasibility of employing SDL (Specification and Description Language) into application of relay protection function sequence visualization is discussed from practical demands. Taking each function component as different states is also presented, as well as mapping information exchanging between different components into transition of different states compatible with EFSM (Extended Finite State Machine). On the basis, this target system is modeled by SDL, the sequence of every component action visualized dynamically through MSC (Message Sequence Chart) is achieved, thus protection function logic is visualized directly. Experiment system is constructed and sequence of distance protection is visualized preliminary. The result also shows that the proposal approach is feasible. In the end, problems such as information model, coordination design of hardware and software, etc. are analyzed and discussed.

Key words: smart substation; relay protection; function sequence visualization; IEC61850; SDL; EFSM

0 引言

IEC61850 标准首次规范了变电站网络和通信系统, 其功能重组与分配的理念直接影响了继电保护的架构、元件设计, 但是对于功能元件模型的规范在一定程度上为功能时序的可视化提供了基础^[1]。

时序图主要是通过描述对象之间交互消息的时间顺序直观显示多个对象之间的动态行为。当前, 常用的有 UML 行为图、消息序列图(Message Sequence

Chart, MSC)。对于继电保护功能逻辑时序的分析主要是采用静态的方法, 一种是通过工具软件读取装置符合特定格式(如: COMTRADE 格式)的事件记录文件、故障录波文件, 解析后将事件信息、时间信息展示出来。另一种方式是借助已有的自动化系统, 将保护中间节点动作的编码文件(如: G 语言格式)上传至监控系统服务器, 通过监控系统软件将其包含信息展示出来。但这两种情况下只能看到最终的结果, 在一定程度上可以实现逻辑分析的目的, 但是可视化程度较低, 尤其是动态展示方面有待提升。IEC61850 标准的应用为动态展示保护功能时序提供了信息模型基础^[2-6]。

基金项目: 国家电网公司科技项目“继电保护远程监控及故障诊断技术研究与应用”

本文分析了继电保护功能模型以及模型间交互信息, 给出了采用 SDL 语言描述的保护功能状态机, 基于此提出了动态可视化展示保护功能时序的方法, 并在实验室环境下验证了方法的可行性。

1 SDL 建模继电保护功能思路

1.1 SDL 语言概述

SDL 是一种面向对象的形式化描述语言, 由国际电信联盟(International Telecommunication Union, ITU)制定形成 Z.100 建议, 其拥有自己的语义、语法、数据结构, 用于描述离散系统。尤其是面向对象的技术、能够与 ASN.1 以及 UML 融合的表达力与 IEC61850 标准的制定思想有很多类似的地方^[7-8]。

1.2 建模思路

SDL 语言适用于继电保护功能建模主要基于两个前提, 一是 IEC61850 标准在对保护功能及信息属性抽象的基础上进行了规范, 使得功能模块划分原则、数据类以及相互交互的信息格式等方面有同一标准遵循, 虽然不同的实现者对标准的理解在某些细节有所不同或者存在自定义的可能性, 但是, 其概念设计的本质一致; 二是继电保护系统运行时对于保护对象异常条件下的反应可以看作不同的功能模块相互交互信息协同完成的结果。由此可以得到的功能模块转移的扩展有限状态机, 称之为“功能状态机”。这是进一步工作的基础。

2 距离保护时序可视化关键技术

2.1 功能元件划分

为简化起见, 将距离保护从功能上分为距离保护故障处理元件(PDIS)、方向判别元件(PDIR)、振荡判别元件(RPSB)、断路器功能元件(XCBER)组成。设有重合闸元件(RREC)。故障发生时, 按顺序执行以上五种功能元件, 可以认为是五种不同的功能状态之间的转移。

2.2 数据结构设计

不同的功能状态机通过路由信号进行相互交互, 各状态机依据不同的信号确定状态如何转移。文献[1]中规范了每个逻辑节点的信息模型, 包括元件状态及定值信息。如 PDIS 和 PDIR 中的信号 Str、Op 分别表示功能启动和动作。RPSB 中的 Str、Op、BlkZn 分别表示振荡闭锁检测元件启动、失步跳闸出口以及闭锁 PDIS。RREC 中的 OpCls、AutoRecSt 分别表示功能向 XCBER 发送合闸信号和自动重合闸状态。

状态信息表示本逻辑节点在运行过程中启动、动作等状态, 反映了故障情况下功能元件对外部环

境激励的响应情况, 表现为状态机输出相应信号和状态迁移, 是可视化系统需要展示的对象。由于标准中每个逻辑节点中均采用相同名称的信号表示状态, 为了避免采用 SDL 描述时同一信道上出现信号冲突, 有必要按照 SDL 语法的要求构造合适的数据结构。

2.3 状态机设计

状态机是自动机理论在实际中应用的直接体现, 主要用来表示具有严格时序的逻辑, 继电保护中不同元件之间的协调控制具有一定的代表性^[8]。另外, 状态机还用于表示一个有限集合中不同状态的转移, 以体现系统的整体特性。文中的有限集合指的是继电保护的所有功能组成的集合, 可称之为“功能状态机有限集”。基于两者的基础之上实现的“功能状态机”就是继电保护设备在不同环境下的动作行为体现。距离保护的功能状态机如图 1 所示, 是 SDL 语言描述系统的主要依据。

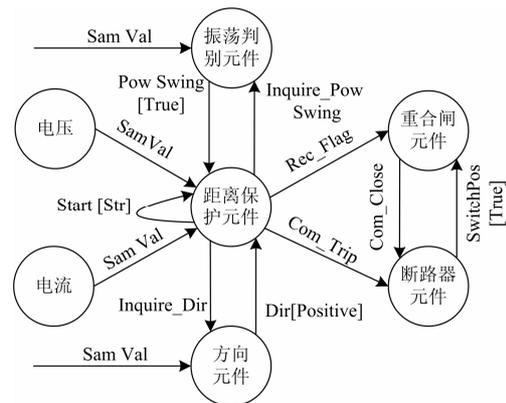


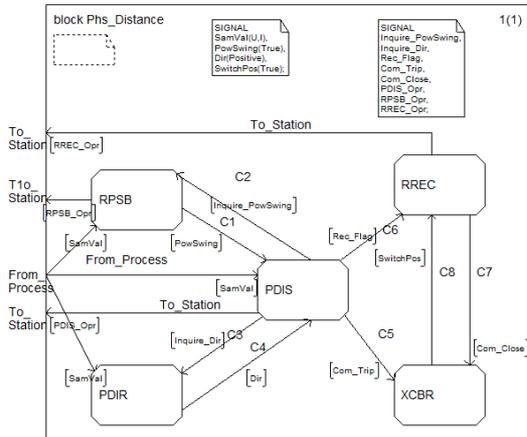
图 1 距离保护功能状态机

Fig. 1 Function state machine of distance protection

2.4 SDL 建模

距离保护“功能状态机”的设计, 在体现保护动作行为的基础上简化了各元件之间交互的信号。本文选择在 Telelogic Tau4.0 集成环境下设计 SDL 系统。整个 SDL 系统的设计可分为两部分: 一部分是 SDL 系统与外部环境之间、SDL 系统内部各功能块之间的相互交换的信号; 一部分为基于“功能状态有限集”中功能元件的定义与划分。由于 SDL 语法不支持复杂的数据结构, 所以在功能元件的定义与划分时可以采用 SDL 嵌入 C 语言的方式来实现, 实现两种语言的相互补充^[9-11]。

图 2 是用 SDL 描述距离保护的概念系统, 不存在系统运行的行为情况, 所以在采用 SDL 建模时不需要过多考虑具体实现的问题, 只要确保各功能状态之间的交互的信息以及功能状态的功能正确。



注：图中右上角为定义的数据结构；“[...]”表示各状态之间转移的信号。

图 2 距离保护 SDL 系统的功能块描述图

Fig. 2 Function block description picture in SDL system of distance protection

2.5 进程实现

进程是 SDL 系统的基本组成单位，系统的行为主要由进程间的协同来体现。具体到本系统中，进程的任务就是实现每个逻辑节点的功能，即每个元件的功能。振荡闭锁元件是与距离保护配合的重要元件之一，以 RPSB 元件为例给出该进程的实现其过程及方法。

依据 SDL 内核调度机制，系统运行时 RPSB、PDIS 等所有进程处于并发状态。PDIS 进程在检测到外部故障并启动时，需要 RPSB 进程对系统是否振荡情况的判别，其过程类似距离保护程序对振荡闭锁功能程序的调用，进程内部实现如图 3 所示。在实现元件功能的过程中，一方面利用了 SDL 描述逻辑和状态迁移的优势；另一方面利用了 SDL 系统能够调用 C 语言函数的便利^[11]。

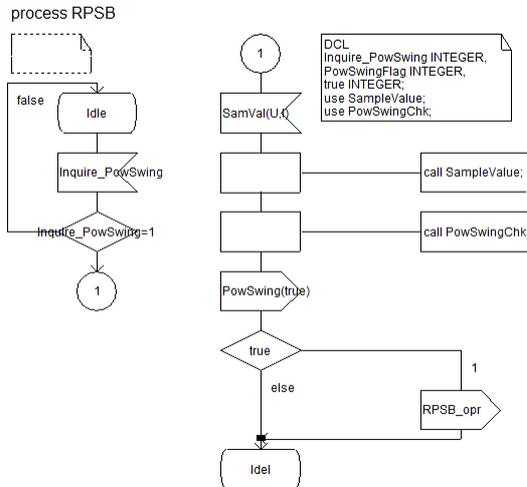


图 3 RPSB 元件进程图

Fig. 3 RPSB component process picture

3 可行性验证

为验证本方法的可行性，在实验室 PSCAD/EMTDC 仿真系统搭建系统模型，距离保护安装位置、故障位置如图 4 所示，系统相关的参数如表 1 所示。

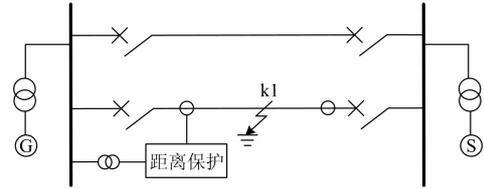


图 4 系统试验接线图

Fig. 4 Power system model for simulation

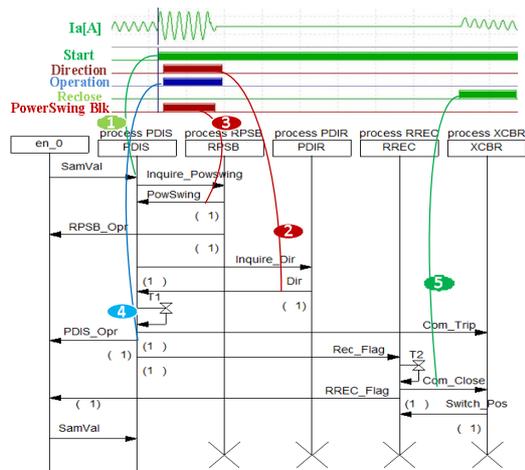
表 1 系统相关的参数

Table 1 System parameters

参数	取值
线路长度 L	300 km
单位正序电阻 R_1	0.01375 Ω/km
单位正序电感 L_1	0.0003318 H/km
单位正序电容 C_1	3.05×10^{-8} F/km
单位零序电阻 R_0	0.06475 Ω/km
单位零序电感 L_0	0.0009955 H/km
单位零序电容 C_0	1.2×10^{-8} F/km

(1) 案例 1

系统在 0 ms 是发生系统对称振荡，13 ms 时 A 相在 k1 位置发生单相接地故障，故障切除时间约为 120 ms，随后重合成功。保护的录波文件与可视化系统的动作时序对照如图 5 所示。



注：图中的 T1、T2 为定时器，时长可根据定值情况设定；“×”表示相应进程结束并释放；以下相同。

图 5 案例 1 情况下距离保护动作时序与可视化系统 MSC 时序图

Fig. 5 Operation sequence of distance protection and MSC chart of visualization system in case 1

图 5 上半部分为保护装置在故障情况下的动作时序, 下半部分为可视化系统在故障情况下动作的 MSC 图。“1”为距离保护元件启动时刻, 对应于 MSC 时序图中 PDIS 检测到故障并向 RPSB、PDIR 元件发送询问信息。“2”表示故障位于保护安装位置的正方向处, 对应到 MSC 图为 PDIR 向 PDIS 返回故障位置为正方向, 即: 在保护范围内。“3”表示振荡闭锁开放标志, 从上半图可以看出, 在保护启动瞬间, 此闭锁元件开放 160 ms, 以防止在振荡过程中发生故障导致保护拒动, 反映到 MSC 图中 RPSB 元件返回给 PDIS 为系统非振荡现象。“4”表示距离保护动作, 并启动重合闸元件 RREC, 经过 T2 时间后向 XCBR 发送合闸命令, 断路器合闸成功, 即为“5”所示的情况。

(2) 案例 2

系统在 0 ms 是发生系统对称振荡, 13 ms 时 A 相在 k1 位置发生单相接地故障, 约 120 ms 左右故障被切除故障切除时间约为 50 ms, 随后重合失败。保护的录波文件与可视化系统的动作时序对照如图 6 所示。

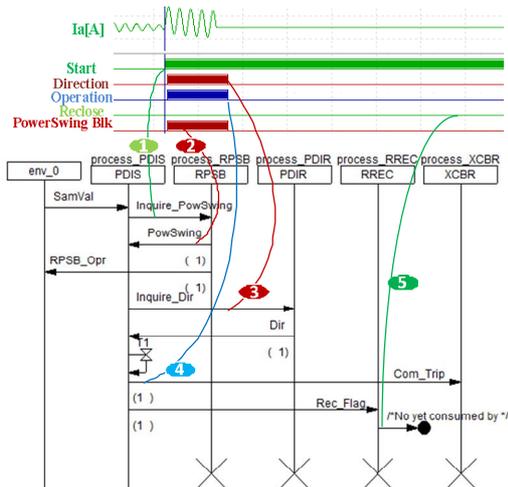


图 6 案例 2 情况下距离保护动作时序与可视化系统 MSC 时序图

Fig. 6 Operation sequence of distance protection and MSC chart of visualization system in case 2

图 6 中对与故障检测、方向判别以及振荡判别结果与过程与案例 1 一致。从 MSC 图的“5”可以看出是 RREC 元件发送的重合信号没有被 XCBR 接收到, 在 MSC 图中很直观、且动态地反映出了这一动作时序。

4 尚需进一步研究的问题

随着智能变电站的发展, 对包括继电保护动作

时序在内的信息可视化程度要求越来越高。虽然基于状态机的理论可以在一定程度上可视化展示元件动作过程, 但要真正满足工程实用化的需求, 还存在许多问题需要进一步研究和解决。

(1) 模型所承载的保护信息

当前 IEC61850 规范的模型所承载的保护相关信息相对简单, 基于这些信息还无法完全反应保护动作的全部内容, 如: 距离元件、方向判别元件、振荡判别元件等, 大多只规范了元件启动、动作等相对通用信息。现有的模型实际上是从信息角度规范的, 后续需要进一步从保护专业本身研究相适应的保护元件模型。

(2) 可视化展示的精细度

不同的应用场合对可视化的要求不尽相同, 文中提到的思路、方法在一定程度上可以满足继电保护专业的教学、培训工作中的需求。而在实际应用中更多是关注元件本身动作的正确性, 后续需要进一步研究如何规范或者描述元件自身的动作行为。

(3) 保护设备软硬件协同设计

继电保护设备是硬件和软件的有机结合, 且不同厂家的保护在逻辑节点的实现方面各不相同。采用状态机的前提是对元件功能进行了一定的封装, 而对于硬件部分因实现的差异无法包含在模型和状态机中。后续需要进一步研究保护设备的软硬件协同设计, 使得状态机描述的对象包含元件相关的软硬件信息, 以实现状态机系统与实际保护设备在行为上的统一。

5 总结

目前, 对于继电保护动作时序的分析主要是采用波形分析工具对故障录波文件进行分析, 这也是故障界定、事故分析等工作的主要方法。元件模型的标准化为在保护时序分析中应用状态机奠定了理论基础, 其可视化程度的提升也有了进一步的空间。本文借鉴了通信协议实现的思路, 首次探讨了 SDL 语言在继电保护功能元件建模中的应用, 并在实验室环境下验证了方法的可行性, 是对应用 SDL 语言来提升继电保护可视化程度的初步探索, 但是要满足工程实际的需求, 还需进一步研究诸如模型、软硬件协同等问题。从继电保护专业的发展趋势看, 可视化程度的提升对于完善二次设备在线监测、变电站的智能化水平具有较强的推动作用。

参考文献

- [1] IEC61850 communication network and systems for power utility automation[S]. Second Edition. 2010.

- [2] 鲍伟, 高翔, 沈冰, 等. 智能变电站非侵入式测试技术研究[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(20): 125-129.
BAO Wei, GAO Xiang, SHEN Bing, et al. Research method of “non-intruding test” for smart substation[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(20): 125-129.
- [3] 张巧霞, 贾华伟, 叶海明, 等. 智能变电站虚拟二次回路监视方案设计及应用[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(10): 123-128.
ZHANG Qiaoxia, JIA Huawei, YE Haiming, et al. Design and application of virtual secondary circuit monitoring in smart substation[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(10): 123-128.
- [4] 梅德冬, 樊瑞, 周斌. IEC 61850 模型信息的规则表达与校验研究[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(3): 131-136.
MEI Dedong, FAN Rui, ZHOU Bin. Research on regular expressions and check of IEC 61850 model information[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(3): 131-136.
- [5] 李宝伟, 倪传坤, 李宝潭, 等. 新一代智能变电站继电保护故障可视化分析方案[J]. 电力系统自动化, 2014, 38(5): 73-77.
LI Baowei, NI Chuankun, LI Baotan, et al. Analysis scheme for relay protection fault visualization in new generation smart substation[J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(5): 73-77.
- [6] MANASSERO G, PELLINI E L, SENGER E C, et al. IEC61850-based systems-functional testing and interoperability issues[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2013, 9(3): 1436-1444.
- [7] Specification ITU. Description Language. ITU-T Z. 100[S]. Geneva, Switzerland: International Telecommunications Union, 2000.
- [8] KOSTIC T, PREISS O, FREI C. Understanding and using the IEC 61850: a case for meta-modelling[J]. Computer Standards & Interfaces, 2005, 27(6): 679-695.
- [9] 宋茂强. 通信软件设计基础[M]. 北京: 北京邮电大学出版社, 2003.
- [10] SDL forum society[EB/OL]. <http://www.sdl-forum.org/>.
- [11] Telelogic Tau AB. Telelogic Tau SDL suite reference manual[S]. 2007.

收稿日期: 2015-11-14; 修回日期: 2016-01-15

作者简介:

陈德辉(1977-), 男, 通信作者, 工学硕士, 高级工程师, 主要研究方向为电力系统继电保护及自动化; E-mail: cndech@163.com

杨志宏(1968-), 男, 工学硕士, 研究员级高级工程师, 主要研究方向为电力系统自动化;

高翔(1967-), 女, 博士, 教授, 主要研究方向为形式化方法在通信系统中的应用、虚拟仪器及网络化测控技术。

(编辑 姜新丽)