

[继电保护]

继电保护自动测试及管控技术研究

文/吕小浩¹ 陈东升¹ 陈瑞峰¹ 毛玉荣² 胡佳佳²

1. 河南送变电建设有限公司; 2. 武汉凯默电气有限公司

针对继电保护现场测试时间、测试效率和质量要求逐步提高的问题,研究继电保护自动测试及管控技术。根据不同厂家、类型继电保护测试任务分析预制测试元件库,针对不同作业场景,通过测试元件灵活组态的方式形成测试模板,实例测试应用验证了所提方案的有效性。

继电保护是电网安全稳定运行的第一道防线,保护正确动作至关重要,保护设备的测试和检验是保障保护正确动作的必要条件。随着智能变电站大量投运,设备规模增长与专业人员数量不匹配的矛盾日益凸显。社会经济发展要求提高供电质量,缩短设备停电时间。因此对保护现场测试的时间、测试效率和质量要求同步提高。

围绕如何提高继电保护设备测试效率和质量的问题,不少专家学者开展相关研究。但针对测试模板的自动实例化、测试过程的数据管控技术鲜有研究,继电保护设备测试效率和质量有待进一步提高。本文提出了继电保护自动测试及管控技术,针对不同作业场景测试内容不同的需求,通过测试元件灵活组态的方式形成测试模板,基于知识图谱建立各信号与SCD引用地址的关联,自动实例化测试模板,基于测试模板实现自动测试,并利用MMS协议实现测试过程闭环及测试过程数据记录,通过测试报告与测试过程数据的一致性校验实现测试数据管控。

继电保护自动测试及管控技术

随着智能变电站继电保护技术的快速发展,新的保护形态不断出现,现场应用的保护装置种类繁多,系统结构呈多样化发展。这种现状增加了保护测试人员熟练掌握保护装置和测试仪功能的难度。文章面向制造厂家,根据测试对象和测试任务预

制测试元件库。基于测试对象,调用测试元件库中的模板,通过通用组态的方式形成可应用于同类设备、场景的通用模板。基于工程SCD文件,利用知识图谱实现测试模板的实例化配置。基于测试模板实现自动测试,并基于MMS协议实现测试闭环及测试全过程数据管控及结果校验。

继电保护自动测试及管控技术流程如图1所示,测试元件库包括基础元件库、专用元件库和通用元件库,每个测试元件库包含若干测试子项,测试子项是测试的最小单位,包含提示类、判断类、投退压板类和整组测试类等。测试前根据测试需求选择测试子项组态生成测试模板,测试模板不基于特定的工程SCD文件,保证了测试模板的可扩展性、通用性和可复用性。

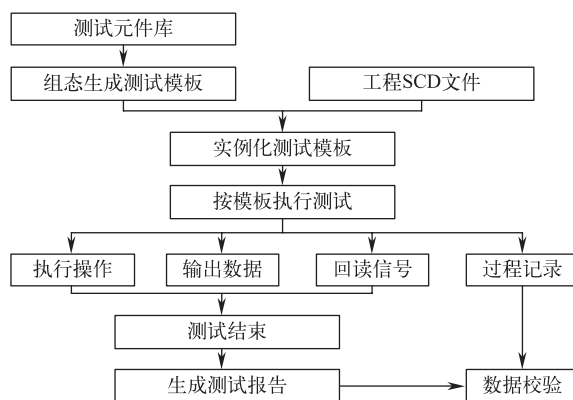


图1 自动测试及管控流程

测试前，基于工程SCD文件利用知识图谱进行测试模板实例化配置。测试时，测试系统根据测试模板配置召唤并远程执行修改保护装置的压板、定值和配置信号等，依据测试模板参数设置输出正常量、故障量数据信号，并回读继电保护设备的动作信号，同时记录测试全过程的执行操作、数据及回读的装置反馈信号。测试结束后，自动生成测试报告，将测试报告与过程记录数据一致性进行校验，自动生成校验报告，保证继电保护设备测试项目的完备性和测试数据的真实性、可用性。

测试模板自动实例化技术

测试模板实例化是将测试中具体的测试子项逻辑判据、施加的信号量、中间变量元素与实际工程SCD文件中的信号定义进行映射，并基于一二次关联和信号配置快速实例化测试子项，形成继电保护设备实例化测试模板。为减少人工配置的工作量，提高测试效率，研究基于知识图谱的测试模板自动实例化技术，构建测试信号配置的知识图谱，工程实施时基于知识图谱测试模板的自动实例化，提高测试配置效率，保证配置的正确性。

测试信号配置知识图谱构建方法如图2所示，分析不同场景、各类型二次设备的测试项目和测试目的，梳理测试中需要使用的数字信号，按IED类型依据九统一继电保护装置标准化数据输出端口模型对需要配置的信息进行建模。基于各IED配置文件中数据输出端口地址信息与建立的信息配置模型的相似性进行匹配、融合并进行人工校验，从而建立测试信号配置的知识图谱。

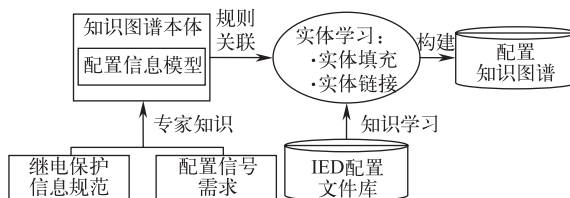


图2 测试信号配置知识图谱构建方法

IED数据输出端口地址信息相似性采用改进BERT模型的文本相似度匹配算法进行计算，BERT模型基础结构如图3所示。BERT模型利用了多头注意力机制的双Transformer编码器结构，每个编码器内含有6个Encoder block，将按照粒度切分后的文本表示为 $T=(t_1, t_2, \dots, t_n)$ ，其中 t_i 为文本 T 的第 i 个字。

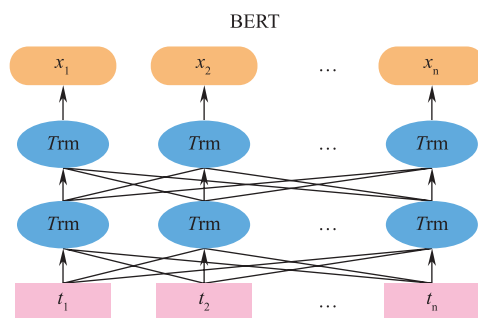


图3 BERT模型结构图

采用word2vec对输入文本进行向量表达，采用余弦相似度度量文本相似度，求得的距离与相似度成反比，距离越小则相似度越大，与配置信息模型距离越小的IED数据输出端口地址信息即为所要匹配映射的配置信息，建立映射关系，进而构建测试信号配置知识图谱，如图4所示。

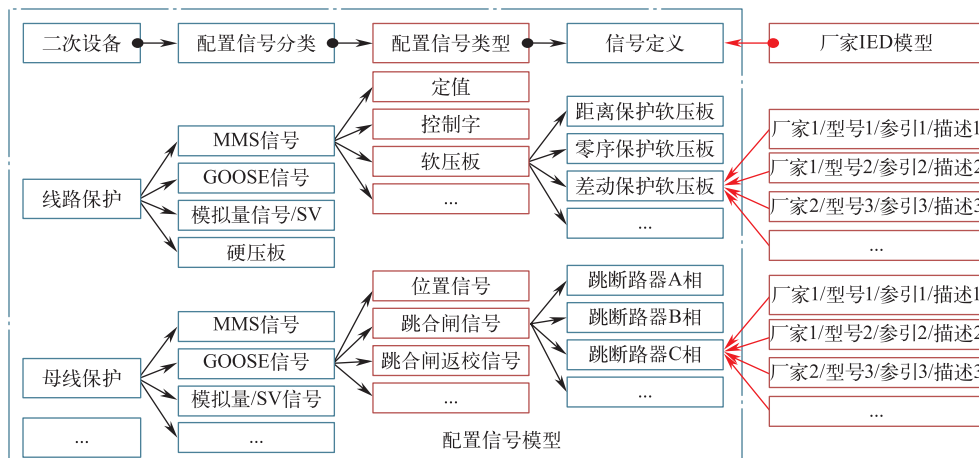


图4 测试信号配置知识图谱

配置时，在工程SCD文件中选择待测试设备，在知识图谱中找到需要配置的信号定义，在SCD文件中解析提取的IED各信息接口地址与知识图谱中信号定义关联的厂家IED模型进行匹配，实现测试信号的自动配置。配置时若在知识图谱中无法匹配到对应的厂家IED模型，则通过设备类型查找配置信号的定义，然后通过IED的信息接口描述与信号定义的相似性，计算匹配及人工校验实现二次设备信息接口地址与测试系统配置信号的关联，并将该关联关系储存到知识图谱中实现知识更新。

基于MMS闭环测试技术

在一个测试模板中可以定义多个测试项目，测试系统按测试模板中预定程序执行测试，为实现整个测试的自动控制，需搭建一个闭环测试系统，实现测试过程中被测装置定值、压板等参数的修改及动作信息的接收。

文章基于MMS协议形成测试过程闭环，测试装置基于实例化的测试模板自动执行测试，通过MMS召唤并记录被测装置版本信息、定值和压板状态，按照过程参数设置远程修改被测装置的压板、定值和控制字等信息，按照故障参数设置施加正常量、故障量，同时接收被测装置的动作GOOSE信号、MMS信号及其相对动作时间和绝对时标信息，依据被测装置的动作信息评估测试结果。

基于MMS形成闭环测试系统，可实现测试全过程数据记录，包括被测装置版本信息、定值和压板状态记录；测试装置施加的正常量、故障量及其时长的记录并形成记录信息序列；以及被测装置动作GOOSE信号、MMS信号及其相对动作时间和绝对时标信息的记录。全过程数据以设定的格式存储形成记录文件，供后续使用。

通过记录闭环测试全过程数据，实现对闭环测试功能和性能的自校，保证测试过程可复现、测试结果可追溯，确保闭环测试的严谨性和科学性。同时还可以将闭环测试记录的全过程数据用于测试报告防篡改管控。此外，闭环测试记录的全过程测试数据还可以用于相同类型不同厂家的保护装置以及同一保护装置不同时期的功能、性能分析，基于闭环测试承载的历史数据自动分析

差异及其优劣性。

测试数据防篡改技术

继电保护设备为电网安全运行的第一道防线，保证继电保护设备测试项目的完备性和测试数据的真实性、可用性非常重要。目前继电保护测试过程和测试数据缺乏有效的管控技术手段，存在人为修正测试报告的可能，影响电网安全运行。

文章研究基于测试全过程数据记录的测试报告防篡改校验技术，将测试报告与测试过程中记录的被测装置参数，测试装置施加的正常量、故障量及持续时间，以及被测装置的动作信息，与测试报告中的相关数据进行比对校验，如果修正测试报告中的相关数据会导致两者不一致，可及时发现测试报告被人为修改。

以线路保护整组动作时间测试报告为例说明测试数据防篡改校验过程，保护整组动作时间测试报告见表1，报告中保护名称、故障类型和整定时间三项数据利用测试模板中的数据进行校验，此部分数据应与测试模板中的数据一致，否则认为数据被篡改；报告中0.7Z（1.2I）跳闸时间利用记录数据中测试装置开始施加故障量的时间以及收到被测装置GOOSE信号的时间差校验，考虑信号传输延时，两个数据应该在一定的误差范围内，否则认为数据被篡改；报告中装置动作信号应与数据记录中的被测装置的GOOSE信号、MMS信号一致，否则认为数据被篡改。

表1 线路保护整组动作时间测试报告

保护名称	故障类型	整定时间/s	0.7Z (1.2I) 跳 闸时间/ms	装置动作信号
分相差动 I 段	AN瞬时	-	22.11	A跳A重
接地距离保护 I 段	AN瞬时	0	30.18	A跳A重
接地距离保护 II 段	BN永久	0.5	529.48	B跳B重三跳
接地距离保护 III 段	CN瞬时	1	1 028.86	三跳不重
相间距离 I 段	AB瞬时	0	30.24	三跳不重
相间距离 II 段	BC瞬时	0.5	529.28	三跳不重
相间距离 III 段	CA瞬时	1	1 027.64	三跳不重
零序 II 段	AN永久	0.5	525.51	A跳A重三跳
零序 III 段	BN瞬时	1	1 026.05	三跳不重
零序加速	AN永久	-	1 026.96	三跳不重

对同一被测装置的同一次测试，测试过程中记录的测试数据运算值应与测试报告中的相关结果数据一致，利用该原则可校验测试报告是否存在人为篡改，实现测试数据管控，保证继电保护设备测试项目的完备性和测试数据的真实性、可用性，保障电网安全运行。

实例验证

基于文章设计的自动测试及管控方案对某厂家线路保护装置进行测试，依据装置类型测试任务选择测试模板，测试设备通过导入被测装置的全站配置SCD文件来获取被测的参数、通道配置等信息，基于知识图谱实现测试模板中待测设备定值、软压板、硬压板、控制信息、保护控制字和保护动作MMS信号等配置信息的自动映射，如图5所示，完成测试模板实例化。

定值	控制字	软压板	硬压板	遥测	遥控	装置参数	MMS信号
1	内部描述	模型描述	值	单位	引用		
2	变化最启动电流定值	变化最启动电流定值	0.200	A	PROT/LLNO.D...		
3	零序启动电流定值	零序启动电流定值	0.600	A	PROT/LLNO.R...		
4	负序启动电流定值	负序启动电流定值	40.000	chm	PROT/POIS1.R...		
5	零序补偿系数计算模式	零序补偿系数K2	(Z0-Z1)/3Z1				
6	零序补偿系数K2	零序补偿系数K2	0.667		PROT/POIS1.K...		
7	零序补偿系数KX	零序补偿系数KX	0.667				
8	零序补偿系数KX	零序补偿系数KX	0.000				
9	差动动作电流定值	差动动作电流定值	30.000	A	PROT/RPSB1...		
10	纵联零序电流定值	纵联零序电流定值	1.000	A	PROT/POIS1.S...		
11	纵联零序电流定值	纵联零序电流定值	1.000	A			
12	纵联零序电流定值	纵联零序电流定值	5.000				
13	纵联零序电流定值	纵联零序电流定值	5.000				
14	对侧识别码	对侧识别码	234		PROT/PSCH7...		
15	本侧识别码	本侧识别码	234		PROT/PSCH7...		
16	线路正序阻抗定值	线路正序阻抗定值	6.000	chm	PROT/POIS1.Z1		
17	线路正序阻抗角	线路正序阻抗角	80.000	deg	PROT/POIS1.L1...		
18	线路零序阻抗定值	线路零序阻抗定值	15.000	chm	PROT/POIS1.Z0		
19	线路零序阻抗角	线路零序阻抗角	78.000	deg	PROT/POIS1.L1...		

图5 定值信息自动映射

测试装置按照测试模板中的相关参数及故障设置自动计算故障量对被测装置加载SV信号、GOOSE信号，接收被测装置保护出口信息、动作报告及遥信变位信息等，并标定出口信息时间，依据装置反馈信息判断测试结果，如图6所示。测试完成后自动生成测试报告，导出报告时利用测试过程记录的数据进行防篡改校验，确保测试结果的可靠性。测试结果表明文章提出的方案可以实现继电保护的自动闭环测试及测试数据管控。

测试项目	测试时间	测试结果	测试时间	测试结果
1. 线路保护	2.000 A	506.9 ms	1350.6 ms	合格
2. 线路保护	2.000 A	508.0 ms	1352.3 ms	合格
3. 线路保护	2.000 A	508.2 ms	1351.4 ms	合格
4. 线路保护	2.000 A	508.0 ms	1351.9 ms	合格
5. 线路保护	2.000 A	1008.7 ms	---	合格
6. 线路保护	2.000 A	1007.9 ms	---	合格
7. 线路保护	2.000 A	1007.9 ms	---	合格
8. 线路保护	2.000 A	1008.8 ms	---	合格

图6 线路保护测试结果

结束语

随着智能变电站大量投运，设备规模增长与专业人员数量不匹配的矛盾日益凸显，继电保护现场测试的时间、测试效率和质量要求逐步提高，面对这一现状开展了以下研究工作：

1) 提出了一种继电自动测试及管控技术，基于测试模板实现继电保护自动测试，基于MMS协议实现测试过程闭环及测试过程数据记录。

2) 讨论了基于知识图谱实现测试信号的自动配置的方法，利用知识图谱建立各测试信号与SCD文件中引用地址的关联，自动完成配置信息的自动映射，实例化测试模板。

3) 研究了基于测试全过程数据记录的测试数据防篡改校验技术，通过测试报告与测试过程数据的一致性校验实现测试数据管控。

(收稿日期：2022-12-26)

参考文献

- [1] 王同文，谢民，孙月琴，等. 智能变电站继电保护系统可靠性分析[J]. 电力系统保护与控制，2015，43(6): 58-66.
- [2] 丁晓兵，杨军，余江，等. 基于微服务架构的继电保护信息主站数据服务方案[J]. 电气应用，2021，40(10): 87-93.
- [3] 林世琦. 基于IEC 61850的继电保护自动闭环测试平台的研发与应用[J]. 河南科技，2021，40(18): 17-20.