DOI: 10.7667/PSPC171794

基于可视化仿真的智能变电站二次安措校核方法

鲍 伟[1]，王 可[2]，高 翔[3]，宋 杰[1]，曾 平[1]，周德生[1]

(1. 国网上海电力科学研究院，上海 200437；2. 上海交通大学电子信息与电气工程学院，上海 200240；
3. 上海毅昊自动化有限公司，上海 201204)

摘要：智能变电站采用网络通信模式，其二次安措具有安措对象复杂、隐含不直观的缺点，安措票的正确性难以保证。提出了智能变电站二次安措的校核方法。首先基于 SCD 文件、ICD 文件和 SPCD 文件，对智能变电站进行仿真建模。然后提出适于计算机处理的安措票形式化描述机制。最后基于 Matlab/Simulink 平台对安措票进行可视化仿真校核，保证了安措操作对检修设备与运行设备的可靠隔离。某 220 kV 智能变电站的应用实例证明了安措校核机制的有效性。

关键词：智能变电站；SCD 模型；二次安措；形式化描述；隔离校核

Verification of security measures for smart substations based on visualized simulation

BAO Wei[1], WANG Ke[2], GAO Xiang[3], SONG Jie[1], ZENG Ping[1], ZHOU Desheng[1]

(1. State Grid Shanghai Electric Power Research Institute, Shanghai 200437, China; 2. School of Electronic Information and Electrical Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China;
3. Shanghai Yihao Automation Co., Ltd, Shanghai 201204, China)

Abstract: Due to the application of network communication for smart substations, the security measures of secondary equipment become implicit and complicated, which makes it difficult to verify the security measures. This paper proposes a strategy for the verification of security measures for smart substations. Firstly, based on SCD, ICD and SPCD, the model for smart substations is constructed. Secondly, a formalized description mechanism for security measures is presented for computer processing. Finally, the security measures are verified through the simulation on Matlab/Simulink, and the reliability isolation of maintenance equipment and operating equipment is guaranteed. Through the application of a 220 kV smart substation, it proves that the verification scheme is intuitional and effective.

This work is supported by Major Project of State Grid Corporation of China “Planning and Operation Control of Large Scale Grid” (No. SGCC-MPLG001-2012) and National Key Research and Development Program of China (No. 2017YFB0903202).

Key words: smart substation; SCD model; security measures; formalized description; isolation verification

0 引言

自 2009 年国家电网公司确定实施智能电网战略以来，基于 IEC 61850 标准的智能变电站工程应用获得了快速发展。迄今为止，国网系统已经有超过 4 000 座智能变电站投入运行，“十三五”末期预计新建智能变电站将达到 8 000 座，我国已成为智能变电站投运数量最多的国家[1-6]。

智能变电站的一大特点就是以“三层两网”的网络通信体系替代了二次系统的大量电缆，通过系统配置文件 SCD 构建二次系统的关联关系[5]，用数据包的对应关系替代了常规综自系统的二次硬联接关系，二次系统体现为虚回路特征[6]，整个二次回路成为“黑匣子”。模拟量采样的交流回路采用 SV 报文通信，保护跳闸、开入开出量等信息采用 GOOSE 报文通信。由于智能变电站独特的通信特点，智能变电站在改建、扩建和装置检修时，二次设备安措的操作往往由 GOOSE/SV 软压板、跳合闸出口硬压板、检修硬压板等多种形式的安措操作要

基金项目：国家电网公司重大专项基金资助（SGCC-MPLG001-2012）；国家重点研发计划资助(2017YFB 0903202)

求组合而成，存在压板数量多、隐含不直观、无“明显电气断开点”等特点。另一方面，由于各个地区电网的规程和习惯不同，其安措票的出票方式也各不相同，难以对不同形式安措票的可靠性进行有效评估。当前智能变电站缺少有效的二次安措校验手段，导致检修人员在进行检修操作时，无法确定当前电力系统的工况和隔离状态，难以保证检修的各项操作不会对电力系统造成不利影响。为了验证二次安措操作对智能变电站中检修设备和运行设备的有效隔离，必须提出一种有效的智能变电站安措校核方法。

为有效解决智能变电站二次系统安全措施的操作安全性问题，开展了各种技术实现方案的研究[7-8]。文献[7, 9]从智能变电站二次安措防误的角度，提出了基于安措隔离原则的安措票自动校验技术，以期减少二次设备操作人员失误。文献[10]从软压板在智能变电站中的应用出发，提出软压板防误操作的基本原则和具体策略，以逻辑表达式的形式对软压板防误逻辑进行形式化方法，以及在监控后台的实现方案。但是上述两篇文献均通过隐含的隔离原则或者逻辑防误表达式实现安措校核，当应用于全站建模时，其表达式复杂度以几何级数增加，难以应用于实际的智能变电站二次安措校核。

本文首先从智能变电站 SCD 文件，智能变电站物理配置描述文件 SPCD(Substation Physical Configuration Description，国网企业标准《智能变电站光纤回路建模及编码技术规范》)，以及 IED 静态配置描述文件 ICD 出发，通过以上三个文件信息的配合，建立起智能变电站全站的信息模型，将所有二次安措的操作对象包含在模型中，保证安措校核的完整性。然后通过提出计算机可读的安措票形式化描述机制，为全自动的智能变电站二次安措校核提供安措票的数据接口。在上述两个基础上，最终提出了基于 Matlab/Simulink 平台仿真的智能变电站安措校核方法。

1　安措校核的关键要素

1.1 配置文件的正确性检查

IEC 61850 规定的智能变电站配置描述文件 SCD 中含有大量的变电站一次设备和二次设备配置信息[11-13]。因此，SCD 文件是智能变电站二次安措校核的重要信息来源。通过 SCD 可以基本搭建起智能变电站一次和二次回路的网络拓扑；另外，二次安措的主要操作对象为软压板，其虽然在 SCD 中有逻辑节点的建模，但是软压板与二次回路的对应关系信息在 SCD 中却难以得到，这一重要信息需要在对应 IED 的 ICD 文件中获得。最后，智能变电站的二次安措还包含有检修硬压板、光纤以及 CT/PT 端子等操作对象，上述操作对象在 SCD 中都缺少信息，必须通过智能变电站物理配置描述文件 SPCD 得到[13]。

综上所述，SCD、ICD、SPCD 三个文件构成了智能变电站建模的信息来源。由此，安措隔离校核的可靠性取决于建模的准确性，而建模又以 SCD、ICD 和 SPCD 三个配置文件为基础，所以上述三个配置文件的正确性是智能变电站安措隔离校核的根本前提。

IEC 61850 规约中已经给出了基于 XML Schema 模式的 SCD 文件语法检查[15]。但是仅对 SCD 作语法层面的检查，还不能满足后续基于 SCD 文件进行信息建模的需要。对 SCD 文件的语义正确性检查是更加重要的一部分，其正确性定义可按照语义强度进行分级，以构成逐级推进的检查方案，分级必须满足以下两个性质：① 所需信息越少的正确性定义，其语义强度越低；② 高等级的正确性定义包含低等级正确性定义。因此，可基于语义强度进行 SCD 正确性的分等级检查，前一步检查通过后，进行下一步检查。

对于 ICD 文件和 SPCD 文件，也可用上述语法检查和语义强度分级检查的方案进行正确性检查。

1.2 形式化描述机制

传统的检修安措均以自然语言的形式构成，不能适应计算机应用处理。为了实现智能变电站的自动化应用，本文提出如下的安措形式化描述机制。

1) 结构

<Bay....>

<Task...>

<Operation..>

• Bay 为间隔信息，含有 name 和 desc 两个属性，对接一次设备的间隔建模。

• Task 为检修任务信息，含有 type 和 desc 两个属性。

• Operation 为检修操作信息，含有 name、iedName、type、connection、state 和 desc 信息。

2) 属性说明

a) Task 的 type 属性表示基于国调 92 号文的检修任务分类，检修任务的类型，如“P1”表示保护第 1 类检修任务。

b) Operation 的 name 为操作对象名称。

c) Operation 的 iedName 表示操作对象的所属 IED 的名称，如“PL2214A”表示属于线路保护 PL2214A。

d) Operation 的 type 表示操作对象的类型信息，

如“SV-IN”表示 SV 接收软压板。

e) Operation 的 connection 表示由操作对象所控制的回路连接的对象。

f) state 表示操作之后的状态。如“ON”表示从退出到投入。

g) desc 表示该安措操作的具体中文描述。

线路保护安措形式化示例

以变电站线路保护检修为例，形式化描述具体如下：

```
<Bay name="xianlu1L" desc="线路 1 间隔">
<Task type="P1" desc="保护 1 类检修">
<Operation name="1SLP3" iedName="PM220A" type="SV-IN" connection="ML2214A" state="OFF" desc="退出母线保护对应线路的 SV 接收压板"/>
<Operation name="1KLP2" iedName="PM220A" type="StrBF-IN" connection="PL2214A" state="OFF" desc="退出母线保护对应线路的 GOOSE 启动失灵接收压板"/>
<Operation name=" 1FLP3" iedName="PM220A" type="Func" connection="NULL" state="ON" desc="投入母线保护对应线路的刀闸强制分软压板"/>
<Operation name="1LP2" iedName="PL2214A" type="StrBF-OUT" connection="PM220A" state="OFF" desc="退出对应线路的线路保护 GOOSE 启动失灵发送软压板"/>
<Operation name="1-13JLD1" iedName="ML2214A" type="CT" connection="CTR14A" state="OFF" desc="短路并断开该线路合并单元的 A 相 CT 端子"/>
<Operation name="2-13JLD1" iedName="ML2214A" type="PT" connection="VTR14A" state="OFF" desc="断开该线路合并单元的 A 相 PT 端子"/>
<Operation name="1RLP1" iedName="PL2214A" type="OVERHAUL" connection="NULL" state="ON" desc="投入对应线路的线路保护检修压板"/>
<Operation name="1LP-1" iedName="ML2214A" type="OVERHAUL" connection="NULL" state="ON" desc="投入对应线路的合并单元检修压板"/>
<Operation name="1-LP1" iedName="IL2214A" type="OVERHAUL" connection="NULL" state="ON" desc="投入对应线路的智能终端检修压板"/>
</Task>
</Bay>
```

上述 XML 语言格式的安措票形式化描述机制，为计算机自动识别安措票提供了数据接口，适用于安措校核的安措票解析。

2 安措校核方法

针对智能变电站实施安措校核的需要，本文提出了基于 Matlab/Simulink 平台仿真的安措校核方法。校核的安措操作对象包括了：软压板、硬压板的投退，光纤插拔，CT/PT 端子的开断等所有实际智能变电站运维过程中可能涉及的安措对象。主要的安措校核目标为检修设备与运行设备的完全隔离。

具体仿真实施步骤如下：

(1) 依据智能变电站 SCD 文件、各装置的 ICD 文件以及 SPCD 文件，建立适用于智能变电站安措校核的静态仿真模型。

(2) 根据智能变电站在线监测装置读取安措操作前的一二次设备状态以及各操作对象所处位置，并于仿真模型中置同样的状态及位置。

(3) 对当前智能变电站可能使用的各种形式的安措票进行形式化描述机制转换，得到格式统一且计算机可读的形式化描述安措票。

(4) 读取安措票(形式化描述机制)，由计算机自动分析其含义，并相应地改变仿真模型中对应操作对象的状态。

(5) 读取检修任务，根据检修任务自动确定检修设备集合。

(6) 根据检修设备集合，依次于仿真模型中对应检修设备施加特征信号，并检验特征信号的可达设备是否都为检修设备，若有例外，则报错，校核停止。

(7) 校核完毕，检修设备与运行设备的隔离符合后续检修工作要求。

上述智能变电站安措校核仿真的具体流程如图 1 所示。

3 仿真建模技术

安措校核的基础是智能变电站仿真静态模型的搭建，其主要从智能变电站的 SCD 文件、各二次系统装置的 ICD 文件以及 SPCD 文件得到。

3.1 仿真模型搭建策略

由于智能变电站是一个复杂的网络系统，而 Matlab/Simulink 平台是一个可视化的仿真环境，如果将所有设备及其拓扑连接都搭建在最前端的可视界面，则仿真模型会极其复杂且违背可视化仿真“直观”的初衷。因此，本文提出了分层次的仿真模型搭建策略，充分利用 Matlab/Simulink 中子模块的封装能力，将仿真模型从下到上依次划分为：装置层、间隔层和系统层。其中，系统层作为仿真环境的最前端可视界面，不予封装，其他两层分别按装置和间隔的划分独立封装。建模过程中，采取从下到上依次封装、逐层建模的策略。

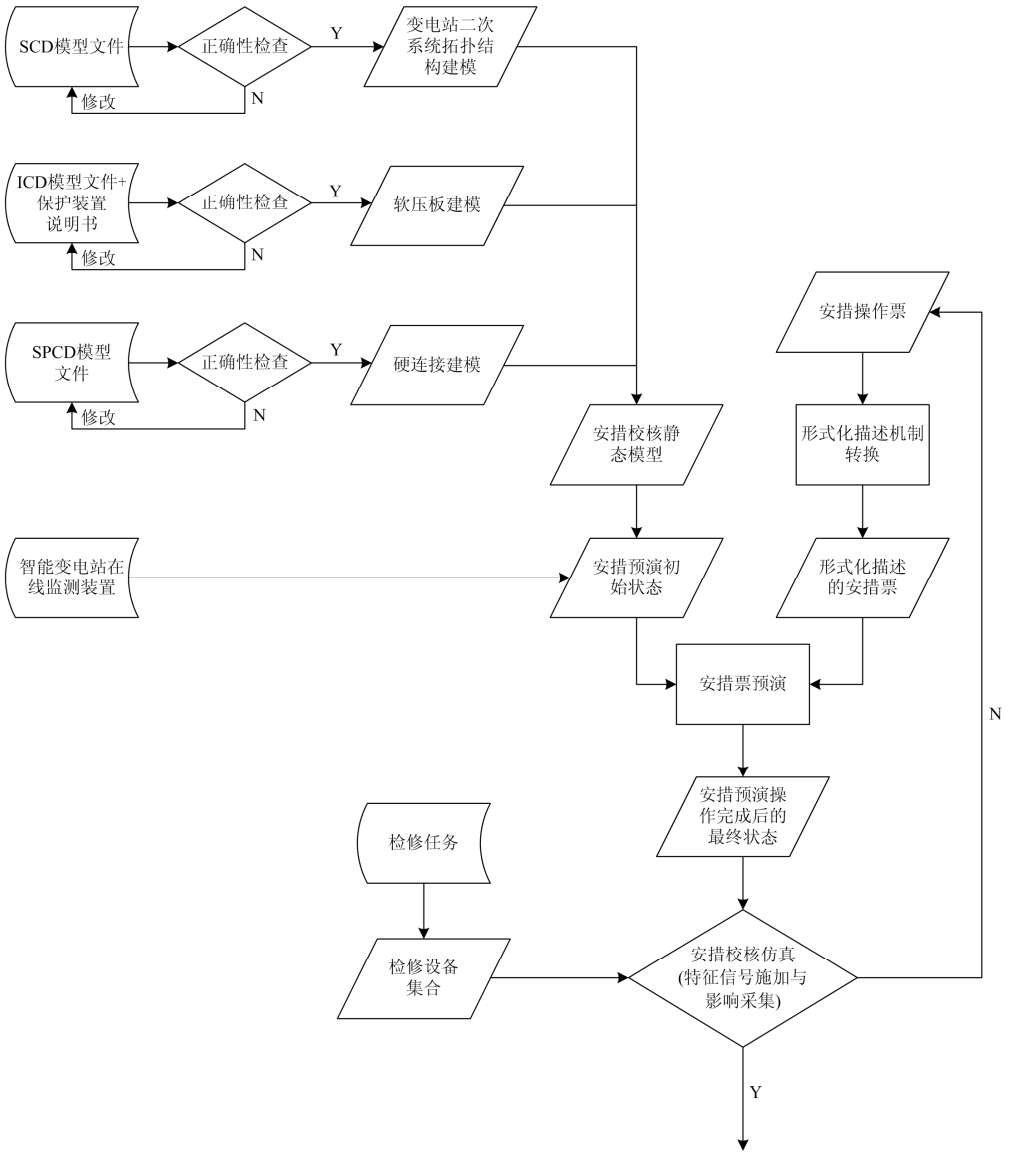


图 1 智能变电站安措校核流程图

Fig. 1 Security verification process of a smart substation

3.2 装置层建模

本层为针对智能变电站各独立 IED 的建模，每个 IED 装置封装成一个独立的模块，鉴于仿真的安措校核目标为装置之间的隔离状态，可将各个装置内部的状态转移逻辑简化为一个“与”门。每个模块外部只设置一个输入和输出端口，内部将装置的所有输入输出进行捆绑封装。

装置的输入端口由 SCD 文件中 IED 标签下的 ExtRef 得到，输出端口由 SCD 文件中 IED 标签下的 FCDA 得到，所有的输出端口各添加监视模块，以跟踪装置的输出变化。装置配置的 SV 和 GOOSE 软压板信息按照 1396 模型[16]的规定从 SCD 文件中获取。装置的软压板和二次回路对应关系在 SCD 文件中缺少描述，可先通过 ICD 文件和装置厂家说明书中的虚端子表映射关系，建立 ICD 文件中软压板和二次回路对应关系模板库，建模时，通过读取装置型号，查找 ICD 文件模板库，得到 SCD 文件中二次回路与软压板的对应关系之后，将装置的软压板作为一个串联开关模块建模在对应的二次回路上，置于装置模块内部。

装置的输入输出回路对应的光纤、CT/PT 端子和检修、跳闸硬压板等硬连接关系由 SCD 文件二次回路端口信息，结合物理回路描述文件 SPCD 得到，然后分别建模成集约的串联开关模块，置于装置模块内部。

一个典型的母线保护装置模块如图 2 所示。

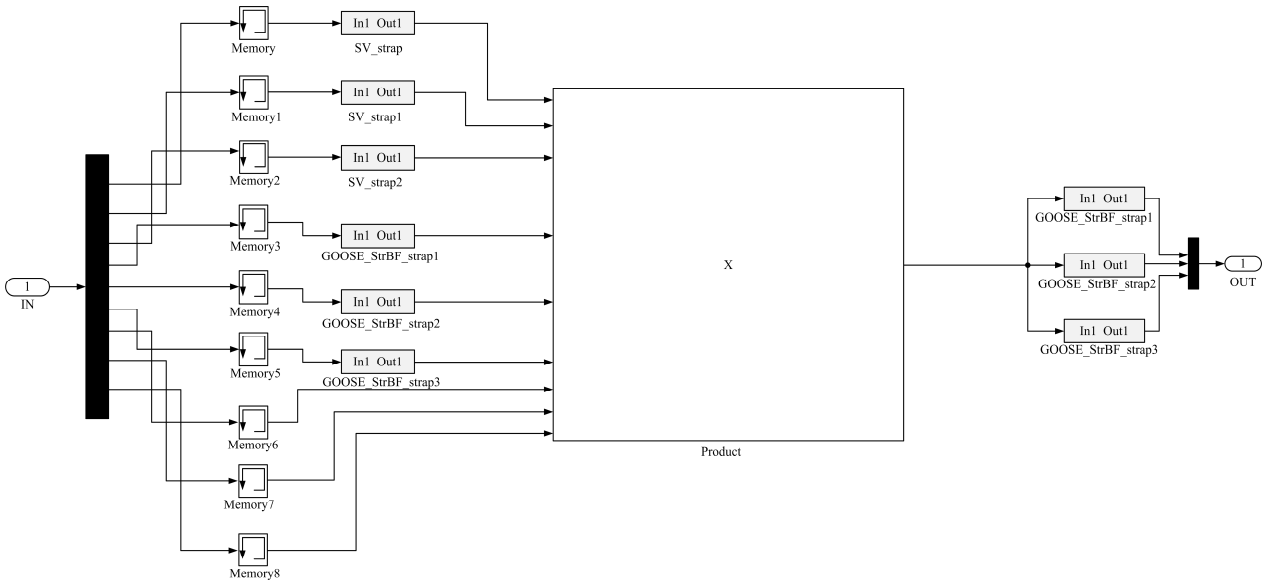


图 2 母线保护装置的仿真模块

Fig. 2 Simulation model of bus protection device

3.3 间隔层建模

本层为针对智能变电站各个运行间隔的建模，每个间隔封装成一个独立的模块，内部由该间隔所包含的若干装置模块构成。变电站间隔的划分按照正在制订的行业标准《智能变电站规范模型描述文件(SSD)》执行。每个间隔模块外部只设置一个输入和输出端口，内部将该间隔与其他间隔相连的所有输入输出二次回路进行捆绑封装。

间隔模块内部各装置之间的二次虚回路及其对应的物理硬连接由 SCD 和 SPCD 两个文件提供数据支撑，在装置层中已经完成的各个装置端口建模基础上，通过 SCD 文件中各装置的 ExtRef 和 FCDA 的对应关系，可建立起装置之间的二次回路连接，完成间隔模块内部的拓扑建模。

典型的线路间隔仿真模块如图 3 所示。

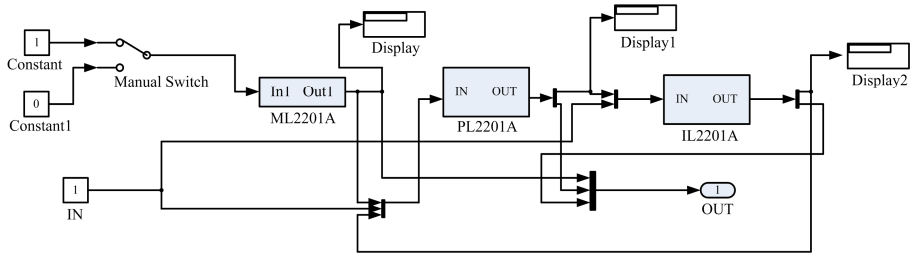


图 3 线路间隔的仿真模块

Fig. 3 Simulation model of line intervals

3.4 系统层建模

本层为智能变电站全系统的建模，是仿真环境最前端的可视界面，其基础构成为变电站所包含的若干间隔模块。间隔模块之间的二次虚回路及其对应物理连接由 SCD 文件和 SPCD 文件给出。

安措校核仿真静态模型的搭建策略及其数据支撑如图 4 所示。

4 实例化仿真验证

4.1 仿真过程

以某 220 kV 双母线接线智能变电站为例，给定检修任务：线路 1 停电状态下，第 1 套线路保护校验与母线保护失灵回路试验，线路 1 间隔相关二次设备接线如图 5 所示。

假定上述检修任务的形式化描述安措票已由人工出票或自动生成等各种形式产生，以下给出其安措校核的仿真具体步骤：

(1) 基于该智能变电站 SCD 文件，各 IED 的 ICD 文件和 SPCD 文件，根据第 3 节仿真建模技术所述建模策略在 Matlab/Simulink 平台上生成用于安措校核仿真的静态模型。

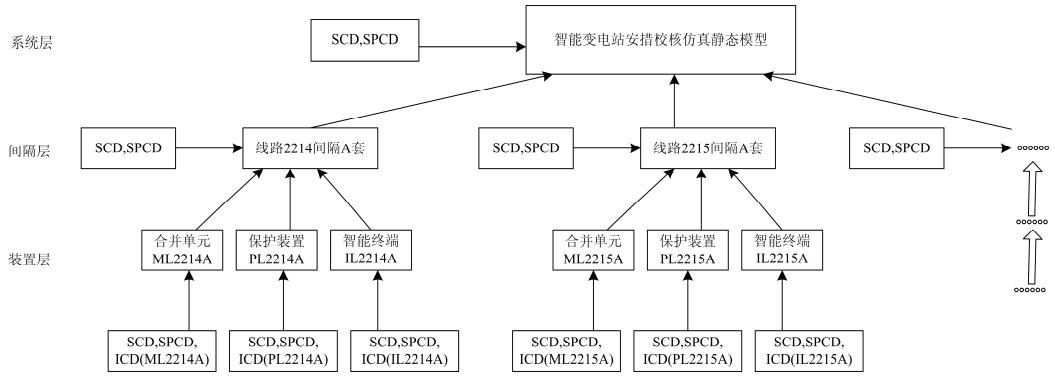


图 4 安措校核仿真静态模型

Fig. 4 Static simulation model of security verification

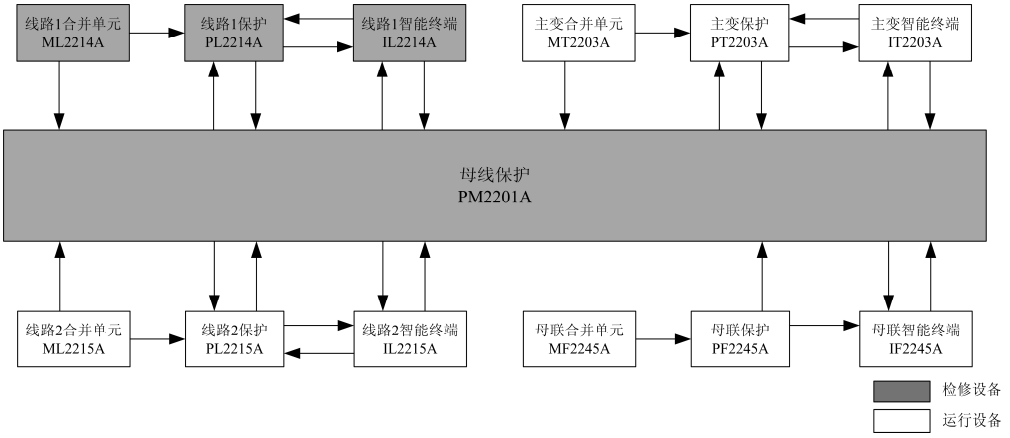


图 5 线路 1 间隔二次设备接线图

Fig. 5 Secondary equipment circuit of line 1 interval

(2) 读取智能变电站在安措操作之前的一二次设备状态及各操作对象所处位置，并于仿真模型相应编号的设备及操作对象置同样的状态，则用于安措校核仿真的初始模型设置完毕。

(3) 依次读取该检修任务对应的如 1.3 节所述形式化描述安措票。分析其语义，并改变仿真模型中对应操作对象的位置，示例如：

<Operation name="1LP5" iedName="PM220A" type="Tr-OUT" connection="PL2215A" state="OFF" desc="退出母线保护对应 PL2215A 线路的 GOOSE 跳闸软压板"/>

上述安措票对应的操作为将仿真模型中“PM220A”装置的“1LP5”软压板置于“OFF”状态。所有安措票读取并仿真操作完成之后，则安措校核的仿真模型处于安措操作完成的状态；

(4) 读取形式化描述的安措票，确定检修任务。根据检修任务确定检修设备集合 A:[ML2214A, PL2214A, IL2214A, PM220A]。

(5) 将 Matlab/Simulink 平台的仿真时间设置为“inf”(无限长)，开始仿真。以检修设备集合 A 中的装置 PL2214A 为例，将其输出信号强制置为特征信号。

(6) 遍历仿真模型中的所有设备，得到输出特征信号的设备集合 B: [PL2214A, PM220A, IL2214A]。

(7) 对任意属于集合 B 的设备，检验其是否属于集合 A，若不属于，程序报警。

(8) 依次遍历检修设备 A 中剩余的设备，按上述(5)—(7)步骤，校核其与运行设备的隔离状态；若都通过，则安措校核完成。

4.2 效用分析

安措票的形式化描述是本文所提出的安措校核机制的基础，对于当前以自然语言写成的安措票，只需要增加从普通安措票到形式化描述安措票的转换环节即可。

4.1 节仿真示例指出，本文所提的安措校核基于可视化的 Matlab/Simulink 平台进行模型仿真，其直观的图形化展示方式可以帮助检修人员在操作之前准确掌握当前智能变电站各种一二次设备的状态，加强对检修操作的管控能力；同时，安措校核过程

为“一一对应”的模拟仿真，对安措票的校核可以进行完全校核，也可根据实际分工情况，进行部分校核。

5 结论

为有效解决智能变电站二次系统运行呈现为“黑匣子”特征的现状，根据国调 80 号文的要求[13]，基于 SCD 模型解析机制的继电保护在线监测系统已经逐步获得试点应用[13]，在此基础上，如何实现有效的检修安措隔离依旧是一个需要解决的问题。

本文针对智能变电站二次检修安措中安措对象复杂、压板数量多，隐含不直观和无“明显电气断开点”等特点，在充分考虑到当前 SCD 文件，ICD 文件、SPCD 文件模型不规范的前提下，提出了基于 Matlab/Simulink 平台仿真的安措校核机制。其主要有以下四个特点和优势：

(1) 针对当前配置文件不规范的现状，提出了对其进行正确性检查的策略，保证了配置文件的完整性和正确性，为安措校核的仿真模型生成提供信息支撑。

(2) 基于 SCD 文件，SPCD 文件和 ICD 文件，以层次化的形式建模智能变电站的一二次系统逻辑回路和物理回路，在保证信号的完整性和建模的完整性同时，实现简洁直观的可视化人机交互界面。

(3) 针对当前二次安措以自然语言构成难以适应计算机处理的缺点，提出了安措形式化描述机制，为计算机自动识别和解析安措票提供了数据结构支撑。

(4) 提出了基于 Matlab/Simulink 的安措校核机制，以直观的可视化方式模拟实际的智能变电站隔离状态，满足各类操作人员对安措票的校核需求，同时适应运行和检修等多种应用场景。

综上所述，本文提出的基于 Matlab/Simulink 平台可视化仿真的智能变电站二次安措校核方法补足了智能变电站二次安措校核不足的问题，提供了在实际操作前的纠错防线，增强了安措票的可靠性和安全性，保证了智能变电站及其所在电力系统在检修任务进行时的可靠稳定运行。

参考文献

[1] ZHANG Baohui, HAO Zhiguo, BO Zhiqian. New development in relay protection for smart grid[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2016, 2016, 1(1): 121-127. DOI: 10.1186/s41601-016-0025-x.

[2] 曹海欧, 张沛超, 高翔. 基于模糊支持向量机的继电保护状态在线评价[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(20): 70-74.
CAO Haiou, ZHANG Peichao, GAO Xiang. Online condition evaluation of relay protection based on fuzzy support vector machine[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(20): 70-74.

[3] 蔡骥然, 郑永康, 周振宇, 等. 智能变电站二次设备状态监测研究综述[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(6): 148-154.
CAI Jiran, ZHENG Yongkang, ZHOU Zhenyu, et al. A survey of research on secondary device condition monitoring in smart substation[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(6): 148-154.

[4] 贾华伟, 郭利军, 叶海明, 等. 智能变电站分布式智能告警研究与应用[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(12): 92-99.
JIA Huawei, GUO Lijun, YE Haiming, et al. Research and application of distributed intelligent alarm in smart substation[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(12): 92-99.

[5] 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.

[6] 黄益庄. 智能变电站是变电站综合自动化的发展目标[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(2): 88-92.
HUANG Yizhuang. Smart substation is the further objective of SAS[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(2): 88-92.

[7] 孙志鹏, 陈晓刚, 叶刚进, 等. 智能变电站安措技术及可视化研究[J]. 电工技术, 2014(4): 19-21.
SUN Zhipeng, CHEN Xiaogang, YE Gangjin, et al. Intelligent substation safety technology and visualization study[J]. Electric Engineering, 2014(4): 19-21.

[8] 黄卿. 面向智能变电站检修帮助的软件平台设计与实现[D]. 成都: 电子科技大学, 2013.
HUANG Qing. Design and implementation of software platform for maintenance of intelligent substation[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology, 2013.

[9] 张旭升, 李江林, 赵国喜. 智能变电站二次安措防误系统研究与应用[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(11): 141-146.
ZHANG Xusheng, LI Jianglin, ZHAO Guoxi. Research and application of the anti-misoperation system for the intelligent station secondary equipment security measures[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(11): 141-146.

[10] 卜强生, 高磊, 闫志伟, 等. 智能变电站继电保护软压

板防误操作策略及实现[J]. 电力自动化设备, 2016, 36(12): 156-168.
BU Qiangsheng, GAO Lei, YAN Zhiwei, et al. Strategy and implementation of soft-clamp misoperation prevention for smart substation protections[J]. Electric Power Automation Equipment, 2016, 36(12): 156-168.

[11] 赵凤贤, 孟祥博, 周雷, 等. 基于变电站 SCD 文件的智能作业系统的研究[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(15): 92-96.
ZHAO Fengxian, MENG Xiangbo, ZHOU Lei, et al. Research of intelligent test system based on SCD file for smart substation[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(15): 92-96.

[12] 赵雨田, 都晨, 程青青, 等. 基于 SCD 文件的智能变电站二次系统 C#模型研究[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(11): 126-132.
ZHAO Yutian, DU Chen, CHENG Qingqing, et al. Research on C# model for smart substation secondary system based on SCD file[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(11): 126-132.

[13] 杨毅, 高翔, 朱海兵, 等. 智能变电站 SCD 应用模型实例化研究[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(22): 107-113.
YANG Yi, GAO Xiang, ZHU Haibing, et al. Case study on SCD application based on demo smart substation[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(22): 107-113.

[14] 高磊, 杨毅, 苏麟, 等. 智能变电站二次系统物理回路建模方法及设计实现[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(24): 130-139.
GAO Lei, YANG Yi, SU Lin, et al. A modeling approach and design implementation of secondary system physical circuit for smart substation[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(24): 130-139.

[15] IEC61850-6 communication networks and systems in substations[S]. Geneva, Switzerland: IEC Publications, 2009.

[16] 国家电网公司. IEC61850 工程继电保护应用模型: Q/GDW 1396—2012[S]. 北京: 国家电网公司, 2012.

[17] 国调中心调继〔2014〕80 号文. 继电保护设备在线监视与分析提升方案[S].

[18] 徐长宝, 庄晨, 蒋宏图. 智能变电站二次设备状态监测技术研究[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(7): 127-131.
XU Changbao, ZHUANG Chen, JIANG Hongtu. Technical research of secondary equipments' state monitoring in smart substation[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(7): 127-131.

[19] 高翔, 杨漪俊, 姜健宁, 等. 基于 SCD 的二次回路监测主要技术方案介绍与分析[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(15): 149-154.
GAO Xiang, YANG Yijun, JIANG Jianning, et al. Analysis of secondary circuit monitoring methods based on SCD[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(15): 149-154.

[20] 曹海欧, 高翔, 杨毅, 等. 基于全模型 SCD 二次系统在线监测及智能诊断应用分析[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(14): 136-141.
CAO Haiou, GAO Xiang, YANG Yi, et al. Analysis of online monitoring and intelligent diagnosis based on the full model SCD secondary system[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(14): 136-141.

收稿日期：2017-12-11；　修回日期：2018-02-18

作者简介：

鲍　伟(1969—)，男，硕士，高级工程师，研究方向为继电保护；E-mail: baowei0322@sina.com

王　可(1994—)，男，硕士研究生，研究方向为电力系统继电保护；E-mail: liuny0331@sjtu.edu.cn

高　翔(1962—)，男，博士，教授级高工，主要研究方向为继电保护及变电站自动化系统。E-mail: xiang_gao@syhpower.com

(编辑　张爱琴)