

# 电网设备远方操作全过程安全防误方法研究及应用

首先总结了国内当前电网设备远方操作相关的研究成果，然后设计了一种全新的设备远方操作全过程安全防误系统总体架构，接着对安全防误系统关键技术进行了详细阐述，提出了设备远方操作全过程安全防误技术、主站联合防误技术、安全防误校验服务技术及负荷快速切除的批量设备远方操作策略与方法，最后介绍了该系统在智能电网调度控制系统的应用情况。实践结果表明，电网设备远方操作全过程安全防误系统能够有效消除设备远方控制全过程中的安全隐患，全面提升设备远方操作的安全水平。

孟勇亮<sup>1</sup> 孙世明<sup>1</sup> 戴则梅<sup>1</sup> 赵家庆<sup>2</sup> 盛振明<sup>1</sup> 徐春雷<sup>3</sup> 霍雪松<sup>3</sup>/1. 国电南瑞科技股份有限公司 2. 苏州供电公司 3. 江苏省电力公司

## 0 引言

随着“大运行”体系建设的推进，通过多级调度协同的大电网实时监控、综合告警和安全控制技术，实现了多级调度协调控制和故障联合处置，加强了特大电网的可控制性<sup>[1]</sup>。目前断路器远方操作逐渐常态化，迫切需要进一步扩大远方操作范围，从热备用扩大到冷备用，部分调控机构远方操作的电网设备扩大到刀开关<sup>[2]</sup>。

近年来国内外学者和专家围绕安全防误操作技术开展了深入研究和广泛实践，取得了显著的成果。从现有的研究成果来看，主要集中在几个方面：一是主站系统通过拓扑防误、专家规则库等进行分析，实现了调度主站端的操作前

基金项目：国家电网公司科技项目变电站一次设备远方操作安全性关键技术研究与应用。  
江苏省电力公司科技项目智能电网调度控制系统监控功能深化研究与应用。

防误校验<sup>[3-6]</sup>，并做了设备远方遥控到冷备用状态的探索<sup>[2]</sup>；二是通过子站微机防误闭锁或集中的微机五防系统，实现通过站端设备防误闭锁<sup>[7-9]</sup>；三是结合操作票系统进行模拟防误校验，具备电网拓扑防误和防误规则相结合的策略<sup>[10-11]</sup>。

从实践效果来看，上述研究成果对于设备操作的安全防误起到了重要作用，但设备远方操作从调控人员下发控制命令到变电站设备正确响应的整个过程要经过很多环节，仍存在着诸多安全风险，主要体现在以下几个方面。

1) 控制信息缺乏校验。以设备点号为基础的规约传输方式对信息表的一致性要求非常高，主站信息表不一致会导致误控情况发生。通信规约存在隐患，只用点号的通信规约在变电站改造频繁的情况下，不能避免主站控制信息不一致的情况。设备操作的权限控制不够完备，目前多数系统具备了责任区、人员分角色双席操作与监控，但人员与设备的管辖权、操作的权限与级别及其他相关系统的约束还需加强。因此，需要研究全过程安全防误体系，提升各环节的安全性。

2) 防误校核手段局限。目前防误校核仅依赖于主站的拓扑防误或子站的微机防误系统，主站拓扑防误受限于基础数据的全面准确可靠，在遥信尤其是刀开关不准确的情况下，往往难以通过拓扑校验；而子站则只局限于本站内的闭锁规则，无法考虑对侧且维护不便。因此，需要研究主站联合防误的操作交互机制及防误规则源端维护共享，实现主站联合防误。



孟勇亮/高级工程师

### 关键词/Keywords

设备远方操作 ·  
全过程安全防误 ·  
安全防误校验服务 ·  
安全规约 ·

3) 校验方法不够灵活。电网拓扑校验是主要的校验方法，在接线方式特殊时可结合防误规则辅助判断，随着大电网互联互通，还需要考虑对电网运行的影响。因此，需要研究基于电网拓扑、安全校核相结合的安全校验服务，实现考虑电网安全风险和多种防误需求因素的设备防误服务多种灵活组合方式。

4) 操作方法单一低效。普通遥控操作一般是分钟级操作，顺控、群控等设备操作单一对象平均也需要10 s以上，程序化控制还未能投入生产，因此，需要研究负荷快速并发切除的批量设备远方操作策略与方法，在特高压电网发生直流闭锁时能够快速切除批量负荷，保障电网运行安全。

因此，为提高设备操作过程的安全性，需要从主站侧、子站侧及远动通信等各环节建立更加严密的远方操作相关多重校验机制，实现全过程

的安全防误，有效消除设备远方控制全过程中的安全隐患，全面提升设备远方操作的安全水平。本文在现有智能电网调度控制系统中设计了基于主子站协同的设备远方操作全过程安全防误系统，并从系统整体架构、关键技术、示范应用及后续展望等四个方面展开了论述。

1 总体框架

本文以提高电网设备远方操作安全为目标，提出了基于主子站协同的设备远方操作全过程安全防误总体框架，如图1所示。首先依据设备远方操作的信息传输流程将整个远方操作分为主站、子站及主子站规约传输三个环节，然后综合分析了设备远方操作在三个环节中存在的安全隐患，在总体框架中分别描述了相应的技术解决方法。

主站侧在D5000平台上实现安全防误校验功

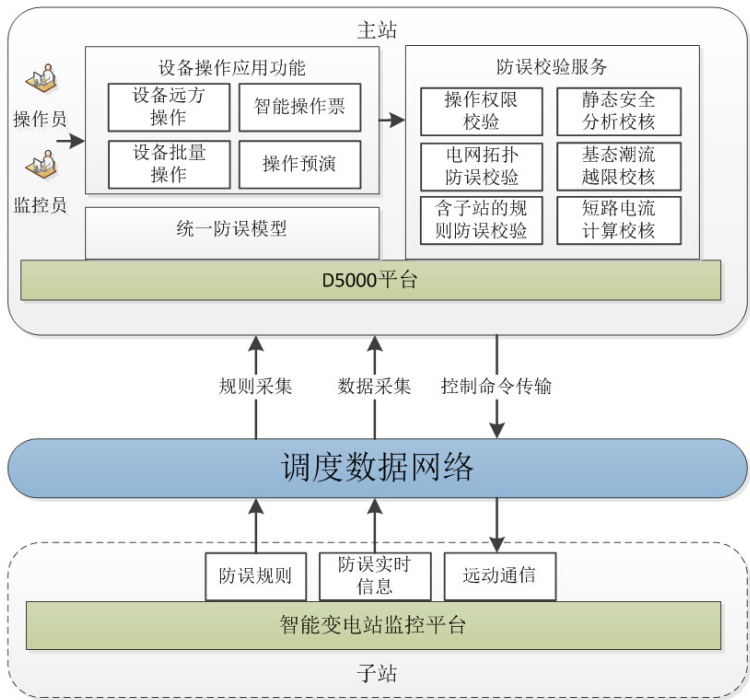


图1 远程操作全过程安全防误总体框架

能，首先构建了统一防误模型，通过子站防误规则源端维护上送给主站，并采集子站特有的网门、接地线等防误模型相关信息，实现主子站联合防误的操作交互机制及防误规则源端维护的操作票防误逻辑。然后基于D5000平台服务总线，将控制信息校验、权限校验、电网拓扑校验、静态

安全校核、潮流越限校核及短路电流计算校核等封装成服务。最后，单一设备操作、批量设备操作及操作票等，都调用统一安全防误校验服务进行防误校核。

主子站规约传输层，在基于边界安全的纵深防护体系下，通过纵向加密装置和调度数据网专

用的防护策略实现数据安全传输<sup>[12]</sup>，并扩展了IEC 60870-5-1 04规约，实现了设备编号和点号的双重校验以及测控装置IP校验，彻底消除了主子站间点号不一致的安全隐患<sup>[13]</sup>。

子站侧基于智能变电站监控平台，将防误规则、防误相关实时数据通过约定的机制上送主站，在子站侧仍可进行本地防误功能的校验，并接受主站设备批量操作命令。

2 关键技术

2.1 设备远方操作全过程安全防误技术

从早期的集控系统到当前的智能电网调度控制系统，设备远方操作的范围不断扩大，安全防误手段包括基于调控设备模型进行的拓扑校核和基于闭锁规则进行的变电站微机五防系统，很多地方也采取二者结合的防误办法。本文综合分析了设备远方操作全过程中存在的安全隐患，提出了面向操作全过程的主站安全防误技术、厂站安全防误技术以及操作命令通信过程安全校验的远动规约扩展技术，解决了过去只校验控制点号和控制值的简单校验方法导致误操作及操作过程中其他的安全隐患问题。具体步骤如图2所示。

1) 步骤1：设备选择的操作权限校验。包括操作人员的角色认证、节点权限和责任区的校核，并可通过指纹、IC卡信息校验。

2) 步骤2：主站侧安全防误校验。包括拓扑防误、静态安全校核、短路电流与潮流校核，及特殊的防误规则校验；

3) 步骤3：操作人员的安全证书加密传输。监控远方操作资格的人员配置个人证书，并将数

字证书信息嵌入到控制命令传输过程中，保证传输过程中控制命令信息的合法性，防止不具备操作资格的人员随意遥控设备。

4) 步骤4：安全证书的校核。数据采集服务器收到控制命令加密报文后，进行解密验证，通过将数字证书信息嵌入到控制命令传输报文中，可有效解决非法控制命令请求执行，在所有控制传输命令经过的节点上进行数字证书安全认证，避免系统被恶意攻击。

5) 步骤5：下行参数信息双重校核。首先将审核验收通过的点号形成信息表固化版本，然后在遥控操作时进行前后台点号一致性校验，解决调度主站一次设备下行参数信息误改导致的误控问题。

6) 步骤6：传输规约的安全校验。基于IEC 101、IEC 104规约实现操作指令安全校验远动规约扩展，增加符合新的安全校验机制的控制报文结构，主站系统下发点号时，能够将其他校验机制一起下发。同时，子站能够将控制操作出错的各种原因通过扩展的控制报文明确上送给主站系统遥控界面显示并告警。设备控制的预置、执行各环节都增加此校验过程，保证遥控命令的安全可靠传输。

7) 步骤7：变电站站侧的安全校核。基于IEC 61850的变电站监控系统与五防系统的信息集成，分析变电站防误一次接线图的表现形式以及与IEC 61850模型之间的关联，通过变电站一次接线图的拓扑关系，利用深度和广度搜索方法，依据运行操作规则对每一步操作进行五防逻辑判断，从而提高变电站操作和运行的安全可靠性和运行效率。

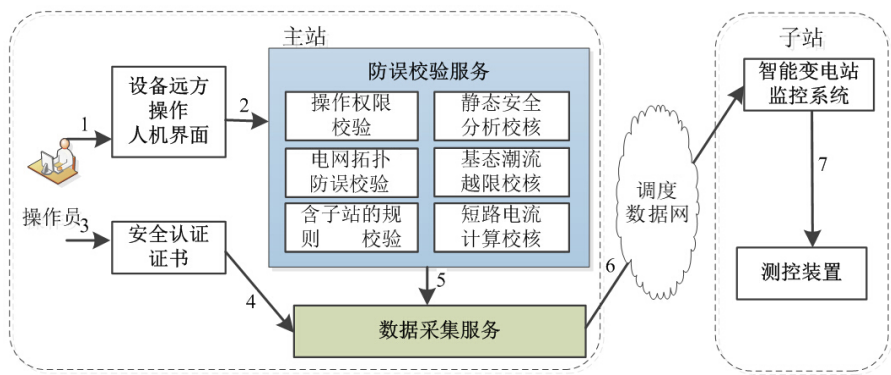


图2 设备操作防误校验过程

2.2 主子站联合的操作交互机制及防误规则源端维护的防误逻辑技术

目前远方操作控制在主子站之间没有形成协同防误的操作交互机制，主站由于只采集一次设备及部分二次设备信号，在进行远方操作时只进行基于全网的防误校验，而子站虽然可以实现基于站内一二次信号的防误闭锁服务，但不能提供给主站远方操作使用，导致远方操作时主站无法获得子站防误校验结果，对于远方操作失败原因无法详细分析。

为了解决此问题，本文提出了基于主子站协同的操作防误交互机制，通过对现有主子站操作信息交互规范扩展，在主站系统实现子站防误模型及防误逻辑的自动召唤及建模，同时在主站实现结合子站防误逻辑的综合防误校验服务，最终实现了设备远方操作主子站联合防误，解决了主子站防误系统因原理、范围不同导致防误校验局限的问题。

1) 防误模型规范。为了实现子站防误规则源端维护全网共享，需制定统一标准的主子站防误信息交互规范，实现子站防误信息和逻辑规则交互，使得不同主子站厂家之间防误信息能够互联互通。

2) 防误逻辑源端维护。以主子站防误模型数据规范和防误信息交互规范为基础，在主站系统研究实现子站防误模型数据自动召唤及建模技术，自动匹配一次设备完成防误模型自动建模，真正达到子站防误模型数据“源端维护”的目标。

3) 防误规则校验服务。以子站防误模型数据自动建模为基础，分析不同子站设备操作防误规则表达式差异性，基于可配置的语义转换方法，实现将不同语义的操作防误规则表达式转换为统

一的语义表达式。另外，适用于语义统一的防误规则表达式的词法解析器，并利用主站模型及数据在调度主站侧实现含子站的规则防误校验服务，作为主站统一安全校验的一个服务。

2.3 基于电网拓扑、安全校核等安全校验服务的设备操作防误技术

服务总线已经在智能电网调度控制系统中得到了大量应用，构建SOA系统架构，屏蔽实现数据交换所需的底层通信技术和应用处理的具体方法，实现多级调度间的故障信息共享<sup>[14]</sup>。SOA的核心是服务，服务主要通过消息的传递进行交互。构建服务的关键步骤是通过适配器将现有应用功能封装实现为服务<sup>[15]</sup>，供D5000平台其他应用调用访问。本文研究了基于SOA模式的远方操作安全校验技术，依托面向服务的软件架构思想，将安全防误系统细化、拆分为多个独立的功能模块，将每个独立功能模块服务化，封装为独立的服务单元，并提供简单易用的调用接口，进而实现各服务单元的灵活结合，应对多样化远方操作对安全防误逻辑的不同需求。

现有的远方操作安全校验系统，采用传统的软件架构方式，一般包含常规校核、拓扑校核和高级应用校核三个部分，必须逐个校验。根据SOA设计思想，本文将上述三类校核拆分和封装为功能相对独立、关联性较弱的多个功能模块，其中常规校核作为单独模块，拓扑校核拆分为面向不同开断设备及针对不同信号的多个模块，高级应用校核拆分为潮流计算、短路电流计算和静态安全分析三个校验模块，将这些模块服务化，提供简单易用的接口，形成安全防误校验的服务单元集。如图3所示。

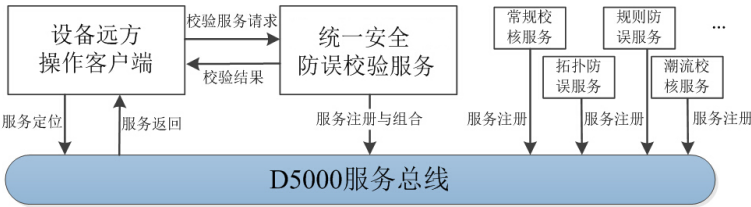


图3 安全校验服务示意图

通过对各服务单元的灵活配置，使之有机地结合起来，从而适应多样化的远方控制安全防误需求。上述各服务单元的功能相对独立，模块之

间的相关性不大，可以覆盖目前安全防误的全部需求。但是，如果每种远方操作均调用全部的服务，则无法体现SOA架构的优越性，也再

次回到了过程冗余、浪费资源的道路上。因此，本文侧重于模块的有机结合，以安全为前提，针对每类远方操作，去除冗余的校验过程，定制专属服务。

## 2.4 电网异常或事故限时负荷快速切除的批量设备远方操作策略与方法

除了上述安全防误校验技术以外，在电网极端故障情况下，远方操作过程中如何保障电网与设备的安全也是本文研究解决的问题。大容量特高压直流(UHVDC)输电系统一旦发生直流闭锁故障，会造成受端交流系统的巨大功率缺额，仅靠故障区域的旋转备用可能无法填补，需要调集互联电网中其他区域的备用以支援系统的频率恢复<sup>[16]</sup>。直流系统发生双极闭锁故障时，为对保持互联系统稳定性和供电可靠性，需采取紧急功率支援措施<sup>[17-19]</sup>。

大功率缺额情况下，负荷快速切除的复杂度高，调控人员在复杂的执行过程中难以通过人工分析实现负荷分配，既要考虑负荷的重要性，又要考虑对故障恢复的贡献度，还要快速将这些负荷切除，迫切需要系统能够提供负荷快速切除的分配策略及切除方法。只有提高设备智能化控制水平，才能够增强受端电网的事故风险防范能力，提高特高压电网运行的故障应急处置能力。

在安全可靠前提下实现批量设备快速并发控制手段，按照“不同变电站同步批量操作、同一变电站顺序操作”的控制原则，保证不同厂站设备可一次并发快速控制，同一厂站设备顺序控制，实现在分钟级内百万千瓦负荷切除。本文研制了顺序优先、电压灵敏度优先、最小费用优先等批量拉路策略，提出了基于多种控制策略的远方设备操作方法。

1) 顺序优先策略是将设备按序号、优先级及负荷大小等要素进行排序，并依次执行控制操作的控制策略，主要研究快速、高效的控制执行算法。

2) 电压灵敏度优先策略主要研究可控设备的电压灵敏度与切除负荷量之间的关系，提出以电压灵敏度为考量依据的可控设备优选方法，尽可能降低批量拉路控制对电网运行造成的影响。当一个节点的系统传输功率接近或达到极限时，系

统维持该节点电压水平的能力就会急剧下降，从灵敏度分析角度来讲表现为节点电压变化对负荷增长的灵敏度。

3) 最小费用优先策略主要研究切负荷带来的经济成本及其影响因素，建立以切负荷费用最小为目标函数的数学模型，采取逐步经济切负荷的迭代方法，总结出经济成本最低的批量拉路控制策略。

## 3 应用情况

设备远方操作全过程安全防误技术在某省地调智能电网调度控制系统完成实施，校验手段由原来的单一拓扑校验扩展为全过程多重校验，取得了良好的效果，下面将从安全、可靠及效率等方面加以介绍。

### 3.1 安全性

主站的防误校验服务除了对权限、证书和点号进行校核以外，还通过安全校验服务进行电网运行安全校核，不但有效避免了人为的维护错误，还验证了对电网运行的影响。扩展的安全规约在多个省份已得到广泛应用，解决了多年来一直存在的自动化系统主子站点号不能同时一致修改的问题。结合子站防误规则的校验，有效弥补了以往无法了解现场网门、接地线等当地微机防误的情况。

### 3.2 可靠性

全过程安全防误校验虽然增加了很多校验环节，但从实际运行来看，并未影响设备远方操作的效率和稳定性，主要得益于采用了服务并发访问的方法，系统运行可靠。

### 3.3 负荷快速切除效率测试

基于实际运行系统进行了100~2 000 MW负荷快速切除命令下发仿真测试，考虑到实际电网运行的安全性，在测试过程中遥控指令以预置/撤销代替预置/执行的方式。测试采用批量设备快速并发控制手段，1 446.2 MW的负荷切除时间在2 min左右，完成112个厂站共274个低压侧负荷开关拉开（见下表），能够完全满足特高压直流闭锁情况下省地协同控制的功率切除需求。

## 4 结束语

随着“大运行”体系的深入推进，集约化

表 负荷快速切除测试结果

| 次数 | 厂站数 | 开关数 | 负荷/MW   | 切除时间/s |
|----|-----|-----|---------|--------|
| 1  | 18  | 50  | 146.3   | 37     |
| 2  | 19  | 55  | 159.8   | 38     |
| 3  | 66  | 126 | 737.3   | 57     |
| 4  | 112 | 274 | 1 446.2 | 143    |
| 5  | 105 | 261 | 1 439.1 | 148    |
| 6  | 118 | 282 | 1 503.3 | 151    |
| 7  | 156 | 395 | 2 255.1 | 201    |
| 8  | 156 | 395 | 2 235.8 | 204    |

程度将不断提高，设备操作范围将进一步扩大，刀开关、二次设备可直接由调控人员进行遥控操作。在此情况下，设备远方操作安全防误将面临更多的挑战，也需要结合调控运行实际问题不断完善提升。十三五期间将逐步展开对“物理分布、逻辑集中”的新一代调控系统体系架构和关键技术的研究，基于在线一体化分析决策和分层分区监控的设备远方操作安全技术将成为未来重要的研究方向。

参考文献

[1] 辛耀中, 石俊杰, 周京阳, 等. 智能电网调度控制系统现状与技术展望[J]. 电力系统自动化, 201, 39(1):1-8.

[2] 林静怀, 米为民, 李泽科, 等. 智能电网调度控制系统的远方操作安全防误技术[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(1):60-64.

[3] 裴东锋, 张磊, 李俊涛. 集控智能操作防误闭锁技术探讨. 中国电业(技术版) [J]. 2012, 46(5):40-42.

[4] 李功新, 周文俊, 林静怀, 等. 基于 D5000平台的调控操作与防误一体化系统[J]. 电力自动化设备, 2014, 34(7):168-173.

[5] 于杰, 陈秋临, 吕鑫, 等. 基于Petri网的调控一体化智能防误系统的建模[J]. 浙江电力, 2014, (11) :19-22, 45.

[6] 李功新, 黄文英, 任晓辉, 等. 调控一体化系统防误校核研究[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(7):97-102.

[7] 田晓声, 胡俊. 监控防误系统与微机五防系统的比较及探讨[J]. 电力与能源, 2015, (4): 549-553.

[8] 唐成虹, 宋斌, 胡国, 等. 基于IEC 61850标准的新型变电站防误系统[J]. 电力系统自动化, 2009, (5):96-99.

[9] 顾拥军, 皮卫华, 杨乘胜, 等. 变电站防误闭锁应用分析[J]. 继电器, 2005, (2): 66-70, 84.

[10] 赵丽萍, 刘伟. 智能调度操作票及防误闭锁技术的研究与实践[J]. 华北电力技术, 2010, 9:51-54.

[11] 董元帅, 程健, 彭彬, 等. 基于间隔模型的图-库-规则-操作票自动生成方法[J]. 电力系统自动化, 2015, (3): 84-89.

[12] 高昆仑, 辛耀中, 李钊, 等. 智能电网调度控制系统安全防护技术及发展[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(1):48-52.

[13] 朱海兵, 吴奕, 陈宁, 等. 提高远程遥控安全性的 IEC 60870-5-1 04规约扩展研究[J]. 江苏电机工程, 2014, 33(6):51-54.

[14] 王恒, 辛耀中, 尚学伟, 等. 智能电网调度控制系统数据总线技术[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(1):9-13.

[15] HUANG Xiaoqing, JIANG Hao, XIA Anbang. SOA-based integration of electric utility in open electric market [C] /DRPT2008. Nanjing, China: IEEE; 2245-2250.

[16] 王莹, 刘兵, 刘天斌, 等. 特高压直流闭锁后省间紧急功率支援的协调优化调度策略[J]. 中国电机工程学报, 2015, (11): 2695-2702.

[17] 段瑶, 陈龙, 张步涵, 等. 华中电网的直流紧急功率支援问题[J]. 电网技术, 2012, (2):104-108.

[18] 李国栋, 皮俊波, 郑力, 等. ±500 kV林枫直流双极闭锁故障案例仿真分析[J]. 电网技术, 2014, (4):877-881.

[19] 卢亚军, 蒲莹, 马玉龙, 等. 防止特高压直流工程单双极闭锁的关键措施[J]. 电力建设, 2015, (9):117-122.

作者简介

孟勇亮 (1980-), 男, 本科, 高级工程师, 主要研究方向为智能电网调度自动化。

孙世明 (1981-), 男, 硕士, 高级工程师, 主要研究方向为智能电网调度自动化。

(收稿日期: 2015-12-10) **EA**

(编辑: 杨得润)