

DOI: 10.7667/PSPC170595

关于大型安全稳定控制系统可靠性研究的探讨

罗剑波^{1,2}, 董希建^{1,2}, 崔晓丹^{1,2}, 李德胜^{1,2}, 李惠军^{1,2}, 李雪明^{1,2}, 王娟^{1,2}

(1. 南瑞集团(国网电力科学研究院)有限公司, 江苏 南京 211106;
2. 智能电网保护和运行控制国家重点实验室, 江苏 南京 211006)

摘要: 特高压交直流电网建设过渡期, 交直流交互影响加剧, 送受端耦合紧密, 电网安全稳定运行对于安全稳定控制系统(简称“稳控系统”)的依赖性大大加强。稳控系统近年来呈现出大型化、广域化和复杂化趋势, 对其可靠性的研究和设计显得尤为迫切。在分析稳控系统的构成原理及工作方式基础上, 提炼出其可靠性研究的特点和难点, 指出稳控系统整体可靠性的主要影响因素。针对当前稳控系统可靠性研究中缺乏系统性及关键环节把握不准等弊端, 从设备跳闸判据、控制模式、通信通道、运行模式和总体架构等方面, 提出了可靠性研究问题的重点及思路, 从而形成了稳控系统可靠性研究的总体框架, 对于稳控系统以及其他电力二次控制系统的可靠性优化设计具有重要的指导意义。

关键词: 安全稳定控制系统(稳控系统); 可靠性; 影响因素; 隐性故障

Discussion on reliability of large scale security and stability control system

LUO Jianbo^{1,2}, DONG Xijian^{1,2}, CUI Xiaodan^{1,2}, LI Desheng^{1,2}, LI Huijun^{1,2}, LI Xueming^{1,2}, WANG Juan^{1,2}

(1. NARI Group Corporation (State Grid Electric Power Research Institute), Nanjing 211106, China;
2. State Key Laboratory of Smart Grid Protection and Operation, Nanjing 211006, China)

Abstract: In the transition period of UHV power grid construction, AC-DC interaction intensifies, the sending end and the receiving end tightly coupled, security and stability operation of power grids rely more on the Security and Stability Control System (SSCS), which show a large-scale, wide area and complicated trend in recent years, therefore the research and design on reliability of SSCS is particularly urgent. Based on the analysis of the composing principle and working mode of SSCS, the characteristics and difficulties of the reliability research are extracted, and the main factors that influence the overall reliability of SSCS are point out. In view of current research on SSCS reliability not enough systemic, and failure to grasp the key link, the key ideas of the reliability research are put forward from equipment tripping criterion, control mode, communication channel, operation mode, architecture and other aspects, thus forming the overall framework of the reliability research of SSCS, which has an important guiding significance for reliability optimization design of SSCS as well as the power grid secondary system.

This work is supported by Science and Technology Project of State Grid Corporation of China “Research on Top-level Design of UHV AC/DC System Protection”.

Key words: security and stability control system (SSCS); reliability; influencing factors; hidden failure

0 引言

要保证电网安全首先应加强电网对事故的承受能力, 其次是依靠继电保护和自动装置^[1]。继电保护作为保障电网安全的第一道防线, 长期以来

其可靠性得到了普遍重视和深入研究, 研究主要集中在可靠性评价方法和指标^[1-3]、继电保护失效模式及其影响^[4-7]、可靠性建模及其求解方法^[8-19]、可靠性数据收集管理与分析系统^[20-24]四个方面, 形成了较为完善的继电保护可靠性研究体系。

安全稳定控制系统(简称稳控系统)作为保障电网安全的第二道防线, 其可靠性及其对电网影响的研究还相当有限, 仅局限于针对单个元器件、装置

基金项目: 国家电网公司科技项目资助“特高压交直流电网系统保护顶层设计研究”

硬件或单站系统^[25-26]。对于多层次、多站点的稳控系统，特别是跨大区大型稳控系统的可靠性研究尚未见讨论。

我国正处在特高压电网高速发展期，电网特性持续发生重要变化，对电网安全运行提出了新的要求^[27]，对于稳控系统的依赖性也大大加强。稳控系统控制模式已完成由“分散、独立”向“全局、协调”转变，其可靠性破坏导致的误动、拒动将给电网形成难以承受的二次扰动冲击。随着国家电网公司系统保护实施，保证新形势下二次系统可靠发挥作用已成为不容忽视的重要议题，加强大型稳控系统可靠性研究具有现实的迫切性和重要的理论意义与应用价值。

本文立足提升稳控系统整体可靠性，从分析稳控装置的设计原理、逻辑流程、整定方式和稳控系统的控制架构、通信通道等方面入手，剖析影响稳控系统整体可靠性的因素和环节，指出研究方向和技术路线，形成了符合稳控系统特点的可靠性研究框架。

1 稳控系统可靠性的主要影响因素

1.1 稳控系统可靠性研究的特点和难点

可靠性是指元件、设备或系统在预定时间内，规定的条件下完成规定功能的能力^[28]。稳控系统属于可修复系统，深入分析其可靠性研究的特点是选取评估指标、建立计算模型和进行可靠性分析的前提。

1) 可靠性评价指标需求迫切但选取困难。评价指标是否合理关系到提高稳控系统可靠性的途径是否真正符合提高电网安全性的要求。许多资深继电保护专家认为生产运行中使用的继电保护可靠性指标计算是否合理值得讨论^[1-3]。稳控系统架构比继电保护复杂，既包括电流、电压互感器和众多稳控装置(包括分布在同一厂站、同一以及不同控制层不同厂站的多套装置)，又包括起重要支撑作用的通信通道，还包括断路器、直流系统、继电保护、直流控保、直流极控等一、二次设备及相关回路；相比继电保护，稳控系统动作频率稀少，缺乏长期积累的统计样本，决定了其可靠性指标的选取有难度。亟需提出合理的、可直接反映电力系统运行的安全性和经济性的可靠性评价指标，用于引导安全稳定控制专业通过不同途径不断提高稳控系统的可靠性。

2) 稳控系统可靠性模型涉及因素众多、系统级建模难度大。目前，继电保护的可靠性评估主要侧重于单装置硬件可靠性，较少考虑软件失效。相较继电保护，在硬件方面，稳控装置关联的一二次设

备及相关回路比继电保护多，更涉及构成稳控系统的多层、多站和多套稳控装置之间以及装置与联系多套装置的通信通道之间的复杂耦合关系；在软件方面，稳控系统/装置的软件架构、逻辑流程以及策略判据等方面有异于继电保护的特点。单装置可靠性的建模及求解方法可以适当借鉴继电保护，但稳控系统软硬件子系统乃至整系统的可靠性建模无成熟经验可借鉴。

3) 因为外部工作环境(一、二次设备检修操作等)、控制层内/层间装置自身状况、通信通道的可变性，稳控系统的可靠度及失效发生时间具有一定的随机性和概率性，可靠性可能动态变化。动态可靠性不仅取决于稳控系统部件或装置的失效模式，还与部件或装置的失效顺序密切相关。在研究稳控系统可靠性时，还应进一步摸索描述系统失效动态行为的分析方法，进而探索出能全面、细致反映稳控系统可靠性的模型。

4) 从狭义上讲，稳控系统可靠性主要是指不拒动的可靠性(信赖性)和不误动的可靠性(安全性)。面对稳定控制措施量大、全网分布的新形式，以往稳控系统强调“信赖性第一，安全性第二”的传统理念需要适时调整。稳控系统具有多控制层、多控制厂站以及单站内多套装置的结构特点，使得对这两种可靠性提出同样高的要求具备理论上的可能性。

1.2 稳控系统可靠性的主要影响因素

稳控系统功能的实现需要相关一次设备(如断路器、直流系统等)、二次设备(如直流控保、继电保护等)、二次回路、通信通道、稳控装置以及稳控装置之间的协调配合，以发挥其整体性能。根据稳控系统的主要失效模式，将影响稳控系统可靠性的因素分为六类，如图 1 所示。

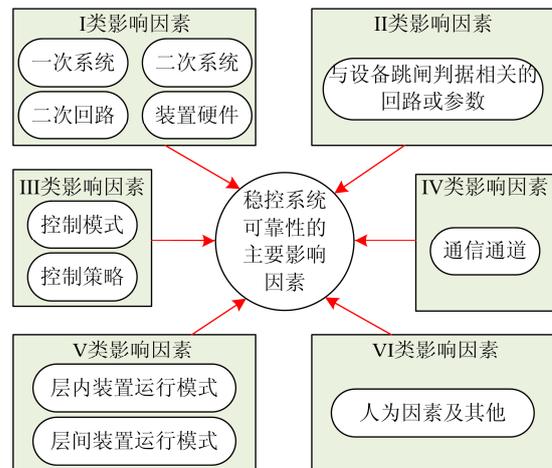


图 1 影响稳控系统可靠性的主要因素

Fig. 1 Main factors affecting the reliability of SSCS

1) 稳控装置硬件失效、相关二次系统发生回路故障、断路器机构故障等因素会导致稳控系统可靠性降低甚至失效, 称为第 I 类影响因素。

2) 稳控装置软件(主要是设备跳闸判据)、一次系统特性、电网运行方式、相关二次设备误发或错发信号、定值整定等判据运行环境参数会导致稳控系统失效, 称为第 II 类影响因素。

3) 稳控系统控制模式是指就地控制(利用就地判据并就地执行), 或是通过分散装设于几个厂站并有信息交换的装置实现分布式(分散决策)或集中式(集中决策)控制。控制模式根据电力系统结构、运行特点及实际条件确定, 是制定稳控系统控制架构和确定运行模式的前提, 称为第 III 类影响因素。

4) 作为稳控系统的重要技术保障, 通信通道直接影响稳控系统的可靠性, 称为第 IV 类影响因素。

5) 同一厂站内, 经常配置两套甚至更多套稳控装置。控制系统运行模式主要指站内 N 套稳控装置间、各控制层稳控装置间的运行模式, 如主辅、双主等串并联、冗余、多数表决等方式。站内及站间装置运行模式并称为第 V 类影响因素。

6) 人为因素影响及其他。人为因素如误操作、误接线、误整定等, 在稳控系统误动原因中占较大比例, 是影响稳控系统可靠性的一个重要而复杂的因素。其他如环境、天气、爆炸等诸多因素亦需考虑。比如, 稳控系统集中决策装置非常重要、不可或缺, 为防止集中决策装置所在变电站直流系统故障导致稳控系统整体失效, 需要采用集中决策装置异地、异站配置的高度冗余方案。将此类统称为第 VI 类影响因素。

可见, 稳控系统可靠性关联因素很多, 其中, 第 I 类涉及单装置可靠性, 目前已有的成果主要集中在这个方面; 第 VI 类不确定性较大, 建模相对复杂, 可以加以近似考虑; 第 II—V 类影响因素是建立稳控系统整体模型的重要环节, 且其研究成果对于研究其他因素对整体可靠性的影响具有借鉴意义, 建议重点关注。

2 关键环节可靠性研究思路及重点

2.1 设备跳闸判据可靠性

设备跳闸判据是稳控系统实施稳定控制策略的基础。跳闸判据的可靠程度对整体可靠性有关键影响。稳定控制所指设备跳闸包括: 输电线路故障跳闸与无故障跳闸, 变压器跳闸, 发电机组跳闸。电力系统安全稳定控制技术导则^[29]对设备跳闸判据提出了明确的要求: 交流线路、变压器、机组的跳闸判据应以电气量判断为主, 对于联络线、联络变

的跳闸判据中应增加防误的辅助判别条件; 需要区分线路的故障跳闸及故障类型时, 宜接入线路主保护的相跳闸接点信号或采用测量、选相元件; 直流输电系统故障的判断应从直流控制保护系统中引入相应的信号, 并与当地测量的交流电气量变化组成判断逻辑。

从多年运行经验来看: 在所用开关量和电气量等接口信息准确的前提下, 稳定控制所用设备跳闸判据是稳定可靠的。对于设备跳闸判据的可靠性研究, 应该重点关注无故障跳闸尤其是输电线路的无故障跳闸^[30-31]。加强对于判据原理方案可靠性的评估研究, 该方面主要涉及评估具体设备跳闸判据对正确执行稳控系统功能的影响; 建立模型、计算跳闸判据原理性失效概率, 定量反映跳闸判据特性、整定定值等与特定故障或系统运行方式匹配程度的随机性, 体现潮流转移、系统振荡、短路故障等因素对无故障跳闸判据原理的影响等。

当前电网正处于“强直弱交”过渡期^[27], 直流双极闭锁一般要采取稳定控制措施。若因直流故障判据导致稳控系统拒动失效, 可能造成交流电网难以承受的后果。现有直流故障判据高度依赖直流控制保护系统提供的相关信号, 本文认为, 应该研发直流故障的后备判据(类似于交流设备的无故障跳闸), 以防止直流故障发生时, 直流控制保护系统因种种原因不能及时、准确地发出相关信号。同样, 直流故障后备判据的可靠性研究评估思路与交流设备无故障跳闸判据一致。

2.2 控制模式可靠性

控制模式直接决定了稳控系统的物理架构, 而物理架构是后续研究运行模式可靠性的载体。显然, 在就地、分布式和集中式三种控制模式中, 就地控制的可靠性是最好的。特高压电网的发展过渡期, 交直流、送受端之间耦合日趋紧密, 故障对电网运行的影响由局部转为全局^[27], 相应地, 稳定控制量也得由全网承担, 需要在全网各类可控资源之间完成控制总量的合理分配。

应根据电力系统稳定的时限特征、控制覆盖范围等因素合理选择控制模式, 采用就地、分布和集中相结合的控制模式。如图 2 所示, 局部问题就地分布控制, 连锁反应阻断集中协调控制。就地分布控制不依靠或依靠有限的厂站间通信通道, 减少对控制层数和通信通道的依赖; 集中协调控制应按照国家功能分别设置分布式控制主站, 减少功能和通道的耦合, 提高运行可靠性。

控制模式是全部稳控系统顶层设计的重要部分, 涉及三种控制模式(就地、分布和集中)的恰当

选择以及各种控制模式占整体比例的合理配置。开展基于控制模式的稳控系统整体可靠性研究,可以用于宏观指导稳控系统专题方案研究和工程设计阶段的具体工作。

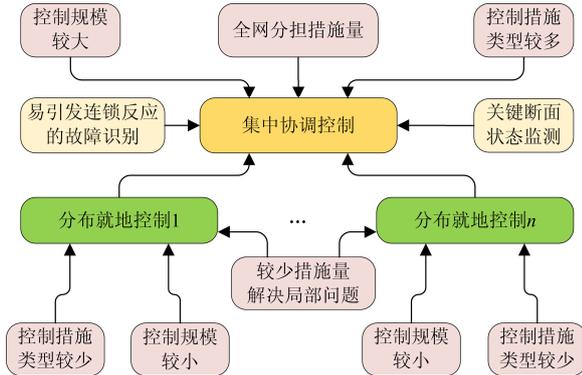


图2 就地、分布和集中控制模式特点及关系
Fig. 2 Characteristics and relationships of local, distributed and global control modes

2.3 通信通道可靠性

通信通道是稳控系统的重要支撑,分布式和集中式稳控系统的功能必须依靠贯通相关厂站的通信通道实现。稳控系统对于通信通道的要求,主要体现在可靠性和实时性两个方面。稳控系统可靠运行很大程度上依赖于通信网的可靠性;如果信息或控制命令的传输速度过慢,会降低稳控系统完成规定功能的能力,严重时会导致控制失效。

针对稳控系统通信通道的可靠性评估,可以根据稳控系统通信通道的结构和特点,适当借鉴继电保护或变电站等通信系统的研究思路和方法^[32-37]。

为保证满足电力系统承受第II类大扰动时的安全要求,稳控系统强调必须在整组动作时间内(一般250~300 ms)对各类可控资源实施足量控制。通信延时是整组动作时间的重要组成部分,应基于现有通信技术水平,以满足整组动作时间为目标,合理确定稳控系统的控制模式、控制层数以及通信通道的实时性能指标,并从通道冗余、通信异常切换后的整组时间控制、通道和信息安全校验等方面开展可靠性研究。

2.4 运行模式可靠性

稳控系统的控制架构设计以控制模式的正确选择为前提。控制架构是稳控系统运行模式的物理基础。稳控系统运行模式的可靠性研究涉及相同功能多装置间运行模式和总体架构运行模式两部分,如图3所示。

特别注意,目前大部分稳控装置采用同站双套

配置方式。分布配置在各控制层和控制厂站内的装置重要性并不相同。起集中协调作用的装置(简称核心装置)极其重要、不可或缺,极端情况下直流系统失压(如2016年发生的某330 kV变电站爆炸),将导致站内核心装置停止工作、整个稳控系统失效。在运稳控系统具有不可中断性,建议大型稳控系统控制架构设计时考虑核心装置的充分冗余配置。

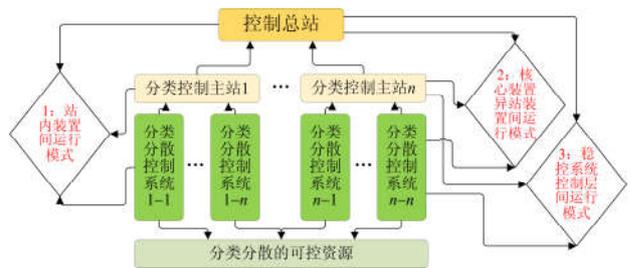


图3 稳控系统运行模式架构
Fig. 3 Operation architecture of SSCS

2.4.1 相同功能多装置配置原则

电力系统安全稳定控制技术导则^[29]规定:220 kV及以上电网的稳控系统宜采取双重化配置。基于继电保护装置配置数量(一般双套配置,稳控装置需要区分线路的故障跳闸及故障类型时,需接入线路主保护的分相跳闸接点信号)、电气回路(如CT配置数量)、出口回路(断路器跳圈等)等与稳控装置强相关的外部环境现状,建议就地、分布式具有设备跳闸识别、控制措施实施功能的厂站采用双重化配置。对于不需要识别故障、不直接作用于跳闸的核心装置(即只通过通信通道与相关控制层装置互联)探讨异地配置方案的可行性(如异地双站、每站双套配置)。

2.4.2 相同功能多装置间运行模式可靠性

目前,同一厂站内的两套稳控装置主要有并列和主辅两种运行模式^[38],二者针对一次系统特点和控制需求区分设计,各有优缺点。如图4所示,还应该进一步开展具有相同功能多套装置间运行模式的可靠性研究(比如异地双站、每站双套配置方案下四套装置间运行模式的可靠性研究,可能会出现多数表决等多种运行模式)。



图4 具有相同功能的多稳控装置运行模式
Fig. 4 Different operation modes of multi-device with the same function

作为稳控系统可靠性研究的关键一环, 应该充分考虑控制解耦、运维便捷等需求, 建立并列、主辅、多数表决等运行模式的可靠性模型, 并嵌入到整体可靠性模型当中进行计算。给出选取何种运行模式的合理建议并提供有针对性的控制策略优化方向。

2.4.3 总体控制架构可靠性

传统稳控系统控制架构基本上可以分为三个控制层: 控制主站、控制子站和执行站。控制主站具备较复杂的区域稳定控制功能, 汇集本站和相关站点的信息, 根据离线预定的控制策略, 下达具体控制命令至控制子站或执行站实施可控资源协调控制, 一般不直接操作本站控制对象; 控制子站具备局部区域稳定控制功能, 并作为控制主站和执行站间信息和命令上传下达的中枢; 执行站主要接受控制主站(控制子站)命令实施就地控制。

控制措施量全网化特征日趋明显的形势下, 需要在传统控制架构上增加一层控制, 以实现大电网可控资源的协调控制。原有控制主站可按类型分类(比如: 直流控制主站、精准负荷控制主站、抽蓄控制主站、切机控制主站等), 各司其职, 在局部稳定控制功能基础上实现更大范围的控制。标准的四层控制架构如图 5 所示, 控制总站和控制主站层装置采用了异地双站、每站双套的配置方案。

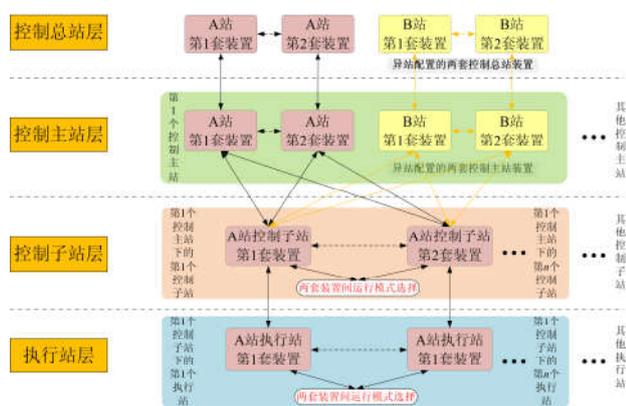


图 5 稳控系统整体控制架构

Fig. 5 Overall control architecture of SSCS

总体控制架构可靠性是研究和提升稳控系统整体可靠性的核心内容。总体控制架构涉及控制层内单厂站多套装置、控制层内相同功能多套装置、控制层内多厂站多套装置、控制层间多套装置间的耦合关联, 本身就是一个复杂系统。

分析、研究控制系统可靠性的方向及方法很多。比如: 通过状态空间法和全概率模型计算控制系统的可靠度; 建立故障树及 Markov 状态空间模型, 求

解控制系统可靠性指标, 分析控制的薄弱环节等。但是, 全面考虑稳控系统控制架构特点的控制系统建模及求解方法尚是空白。

通过开展稳控系统控制架构可靠性研究, 分析指出薄弱环节, 研究、对比各种控制架构的系统可靠性指标, 筛选、设计可靠性指标较高的稳控系统控制架构, 给出站内、站间装置合理化运行模式结论, 提供特定运行模式下的控制策略优化建议等, 这对于构建具体工程的稳控系统控制架构具有重要指导意义。

2.5 其他影响因素可靠性

其他影响稳控系统可靠性的因素还有很多, 诸如: 安全稳定判据和控制策略相关定值的误整定, 稳控系统投运前装置的误接线, 运行维护过程中的方式压板、二次回路误操作等, 也是降低稳控系统整体可靠性的重要环节, 在系统建模时应加以考虑。

在各个方面都尚未开展深入研究的现状下, 建议重点关注可以立即着手研究、改善和提升的关键因素和环节, 比如重点关注影响稳控系统整体可靠性的 II—V 类影响因素并开展相关可靠性研究工作。

3 结语

电网对稳控系统的依赖长期存在, 特别是当前电网快速发展过渡期, 稳控系统规模更大, 布置范围更广、结构更为复杂。而对于稳控系统可靠性的研究很少, 特别是新形势下大型稳控系统可靠性的研究大大滞后。可靠性研究涉及多个环节, 本文从保障稳控系统整体可靠性的角度出发, 归纳了可靠性的主要影响因素, 分析了各个主要环节的可靠性研究方向、研究方法和可靠性提升手段, 初步形成了大型稳控系统可靠性研究的总体框架, 为系统保护可靠性研究与实施提供了基础。后续将对稳控系统控制可靠性建模、可靠性指标以及针对实际工程的对比等方面持续研究。

参考文献

- [1] 贺家李, 郭征, 杨晓军, 等. 继电保护的可靠性与动态性能仿真[J]. 电网技术, 2004, 28(9): 18-22.
HE Jiali, GUO Zheng, YANG Xiaojun, et al. Reliability and dynamic performance simulation of protective relays[J]. Power System Technology, 2004, 28(9): 18-22.
- [2] 陈德树. 继电保护运行状况评价方法的探讨[J]. 湖北电力, 2000, 24(1): 4-5.
CHEN Deshu. Comment method discussion for relay

- protection operation condition[J]. Hubei Electric Power, 2000, 24(1): 4-5.
- [3] 曾克娥. 电力系统继电保护装置运行可靠性指标探讨[J]. 电网技术, 2004, 28(14): 83-85.
- ZENG Kee. Research on operation situation and reliability indices of protective relays in power system[J]. Power System Technology, 2004, 28(14): 83-85.
- [4] Subcommittee P M. IEEE reliability test system[J]. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, 1979, 98(6): 2047-2054.
- [5] BILLINTON R, TATLA J. Composite generation and transmission system adequacy evaluation including protection system failure modes[J]. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, 1983, 102(6): 1823-1830.
- [6] JIANG K, SINGH C. New models and concepts for power system reliability evaluation including protection[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2011, 26(4): 1845-1855.
- [7] 付聪, 安灵旭, 方华亮, 等. 继电保护系统对一次设备可靠性的影响研究[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(11): 38-44.
- FU Cong, AN Lingxu, FANG Hualiang, et al. Study on the influence of protection system on reliability of primary equipment[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(11): 38-44.
- [8] KUMM J, HOU D. Predicting the optimum routine test interval for protective relays[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1995, 10(2): 659-665.
- [9] ANDERSON P. An improved reliability model for redundant protective system: Markov models[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 1997, 12(2): 573-578.
- [10] JOHNSON G F. Reliability consideration of multifunction protection[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2002, 38(6): 1688-1700.
- [11] 王超, 高鹏, 徐政, 等. GO 法在继电保护可靠性评估中的初步应用[J]. 电力系统自动化, 2007, 31(24): 52-56.
- WANG Chao, GAO Peng, XU Zheng, et al. Application of GO methodology in reliability assessment of protective relays[J]. Automation of Electric Power Systems, 2007, 31(24): 52-56.
- [12] 沈智健, 卢继平, 赵渊, 等. 变压器比率差动保护判据的可靠性评估模型[J]. 电网技术, 2008, 32(7): 14-18.
- SHEN Zhijian, LU Jiping, ZHAO Yuan, et al. A reliability evaluation model of percentage differential protection criteria for transformers[J]. Power System Technology, 2008, 32(7): 14-18.
- [13] 张雪松, 王超, 程晓东. 基于马尔可夫状态空间法的超高压电网继电保护系统可靠性分析模型[J]. 电网技术, 2008, 32(13): 94-99.
- ZHANG Xuesong, WANG Chao, CHENG Xiaodong. Reliability analysis model for protective relaying system of UHV power network based on Markov state-space method[J]. Power System Technology, 2008, 32(13): 94-99.
- [14] 张沛超, 高翔. 全数字化保护系统的可靠性及元件重要度分析[J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(19): 77-82.
- ZHANG Peichao, GAO Xiang. Analysis of reliability and component importance for all-digital protective systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2008, 28(19): 77-82.
- [15] 熊小伏, 陈飞, 周家启, 等. 计及不同保护配置方案的继电保护系统可靠性[J]. 电力系统自动化, 2008, 32(14): 21-24.
- XIONG Xiaofu, CHEN Fei, ZHOU Jiaqi, et al. Reliability of protection relay systems with different configurations[J]. Automation of Electric Power Systems, 2008, 32(14): 21-24.
- [16] 汪隆君, 王钢, 李博. 基于半马尔可夫过程的继电保护可靠性建模[J]. 电力系统自动化, 2010, 34(18): 6-10.
- WANG Longjun, WANG Gang, LI Bo. Reliability modeling of a protection system based on the semi-Markov process[J]. Automation of Electric Power Systems, 2010, 34(18): 6-10.
- [17] 戴志辉, 王增平, 焦彦军, 等. 基于动态故障树与蒙特卡罗仿真的保护系统动态可靠性评估[J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(19): 105-113.
- DAI Zhihui, WANG Zengping, JIAO Yanjun, et al. Dynamic reliability assessment of protection system based on dynamic fault tree and Monte Carlo simulation[J]. Proceedings of the CSEE, 2011, 31(19): 105-113.
- [18] 戴志辉, 孔令号, 王增平, 等. 广域保护方案可靠性评估[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(14): 65-69.
- DAI Zhihui, KONG Linghao, WANG Zengping, et al. Reliability assessment of wide area protection scheme[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(14):

- 65-69.
- [19] 郑风雷, 吴杰康, 黄强, 等. 双重化继电保护系统可靠性的五状态空间模型与评估方法[J]. 电力系统自动化, 2016, 40(20): 26-31.
ZHENG Fenglei, WU Jiekang, HUANG Qiang, et al. Five-state space model and assessment method for reliability of dual-redundant relay protection systems[J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(20): 26-31.
- [20] GROEN F J, JIANG S Y, MOSLEH A, et al. Reliability data collection and analysis system[C] // Annual Symposium on Reliability and Maintainability, Jan 26-29, 2004, Los Angeles, USA: 43-48.
- [21] 戴志辉, 王增平, 焦彦军. 继电保护可靠性数据收集系统设计[J]. 电力系统自动化, 2010, 34(15): 47-51.
DAI Zhihui, WANG Zengping, JIAO Yanjun. Design of relay reliability data acquisition system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2010, 34(15): 47-51.
- [22] DAI Zhihui, WANG Zengping. Protection dynamic reliability analysis system based on 3RF technique[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2011, 26(3): 1137-1144.
- [23] 李勋, 龚庆武, 杨群瑛, 等. 基于数据挖掘技术的保护设备故障信息管理与分析系统[J]. 电力自动化设备, 2011, 31(9): 88-91.
LI Xun, GONG Qingwu, YANG Qunying, et al. Fault information management and analysis system based on data mining technology for relay protection devices[J]. Electric Power Automation Equipment, 2011, 31(9): 88-91.
- [24] 李芷筠, 戴志辉, 焦彦军, 等. 继电保护可靠性管理系统设计与实现[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(14): 115-119.
LI Zhijun, DAI Zhihui, JIAO Yanjun, et al. Design and accomplishment of protection reliability management system[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(14): 115-119.
- [25] 赵丽莉, 王梦瑀, 倪明, 等. 安全稳定控制装置硬件系统可靠性分析[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(13): 67-73.
ZHAO Lili, WANG Mengxun, NI Ming, et al. Analysis of hardware system's reliability of security and stability control device[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(13): 67-73.
- [26] 张如义, 周玲, 董贯雷, 等. 单个厂站稳定控制系统的可靠性分析[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(19): 61-64.
ZHANG Ruyi, ZHOU Ling, DONG Guanlei, et al. Reliability analysis of stability control system in single plant station[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(19): 61-64.
- [27] 李明节. 大规模特高压交直流混联电网特性分析与运行控制[J]. 电网技术, 2016, 40(4): 985-991.
LI Mingjie. Characteristic analysis and operational control of large-scale hybrid UHV AC/DC power grids[J]. Power System Technology, 2016, 40(4): 985-991.
- [28] 郭永基. 电力系统可靠性分析[M]. 北京: 清华大学出版社, 2003.
- [29] 电力系统安全稳定控制技术导则: GB/T 26399—2011[S]. 北京: 中国标准出版社, 2011.
Technical guide for electric power system security and stability control: GB/T 26399 — 2011[S]. Beijing: Standards Press of China, 2011.
- [30] 徐海波, 李天宇, 宋晓芳, 等. 大规模风电接入对稳定控制系统中跳闸判据和实时决策的影响[J]. 陕西电力, 2015, 43(7): 11-16.
XU Haibo, LI Tianyu, SONG Xiaofang, et al. Impacts of large-scale wind power integration on the tripping criteria and real-time decision-making in stability control systems[J]. Shanxi Electric Power, 2015, 43(7): 11-16.
- [31] 董希建, 李惠军, 李雪明, 等. 并联高抗对稳控装置线路跳闸判据的影响及定值整定[J]. 陕西电力, 2016, 44(3): 68-71.
DONG Xijian, LI Huijun, LI Xueming, et al. Influence of Shunt reactor on power system security and stability control equipment trip criterion & fixed value setting[J]. Shanxi Electric Power, 2016, 44(3): 68-71.
- [32] 韩小涛, 尹项根, 张哲. 故障树分析法在变电站通信系统可靠性分析中的应用[J]. 电网技术, 2004, 28(1): 56-59.
HAN Xiaotao, YIN Xianggen, ZHANG Zhe. Application of fault tree analysis method in reliability analysis of substation communication system[J]. Power System Technology, 2004, 28(1): 56-59.
- [33] 石征, 侯思祖. 光纤保护通道的可靠性综合评价研究[J]. 电力系统保护与控制, 2009, 37(11): 91-94.
SHI Zheng, HOU Sizu. Reliability comprehensive evaluation for optical fiber protection channel[J]. Power

- System Protection and Control, 2009, 37(11): 91-94.
- [34] 崇志强, 戴志辉, 焦彦军. 典型广域保护通信网络的信息传输可靠性评估[J]. 电力系统及其自动化学报, 2014, 26(4): 20-24.
CHONG Zhiqiang, DAI Zhihui, JIAO Yanjun. Information transmission reliability assessment of communication network in typical wide area protection[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2014, 26(4): 20-24.
- [35] 梅鲁海. 基于SDH光网络的分层区域式保护通信系统的可靠性研究[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(21): 81-85.
MEI Luhai. Reliability research of layered regional protective communication system based on SDH optical network[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(21): 81-85.
- [36] 李俊刚, 张爱民, 张杭, 等. 广域保护系统数据网络可靠性评估[J]. 电工技术学报, 2015, 30(12): 344-350.
LI Jungang, ZHANG Aimin, ZHANG Hang, et al. Reliability evaluation of the wide area protect system[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(12): 344-350.
- [37] BO Zhiqian, LIN Xiangning, WANG Qingping, et al. Developments of power system protection and control[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2016, 1(7): 1-8. DOI: 10.1186/s41601-016-0012-2.
- [38] 李惠军, 汤奕, 李雪明, 等. 电源送出安全稳定控制系统典型方案及装置主辅运设置原则分析[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(4): 141-145.
LI Huijun, TANG Yi, LI Xueming, et al. Analysis of the typical schemes for security and stability control systems of electric power transmission and the devices' main and auxiliary operation configuration principles[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(4): 141-145.
-
- 收稿日期: 2017-04-22; 修回日期: 2017-08-15
作者简介:
罗剑波(1963—), 男, 博士, 研究员级高级工程师, 主要研究方向为电力系统安全稳定控制; E-mail: luojianbo@sgepri.sgcc.com.cn
董希建(1982—), 男, 通信作者, 硕士, 高级工程师, 主要研究方向为电力系统安全稳定控制; E-mail: dongxijian@sgepri.sgcc.com.cn
崔晓丹(1981—), 男, 博士研究生, 高级工程师, 主要研究方向为电力系统安全稳定分析及控制。E-mail: cuixiaodan@sgepri.sgcc.com.cn
- (编辑 周金梅)