

# 基于综合风险控制的故障安全连锁系统

Fault safety interlocking system based on integrated risk control

罗琳 师涛 王伟 赵欣洋

Luo Lin, Wang Wei, Zhao Xinyang

(国网宁夏电力有限公司超高压公司 750011)

State Grid Ningxia Electric Power Co., LTD. 750011

**摘要:** 安全连锁故障指的是一次或多次的初始干扰(单一或多个)导致的一次或多次的停电事故。电网是一个高阶的非线性动力学系统,任何的初始干扰,如线路的故障停运、发电机的脱网等,都有可能通过系统中的多个环节的非线性效应而被放大,最终引起整个系统的崩溃。尤其是近年来,随着电网与物理信息系统的不断融合,电网中出现的信息、通讯等故障也可能引发电力系统安全连锁问题。本文论述了综合风险控制的故障安全连锁系统的概念,对电力系统安全连锁故障模型和电力系统安全控制进行阐述,并提出了故障安全连锁系统的实施措施。

**Abstract:** Safety interlock fault refers to one or more power failure accidents caused by one or more initial interference (single or more). The power grid is a high-order nonlinear dynamic system. Any initial interference, such as the fault shutdown of the line, the off-grid of the generator, may be amplified by the nonlinear effects of multiple links in the system, and eventually cause the collapse of the whole system. Especially in recent years, with the continuous integration of the power grid and the physical information system, the information, communication and other faults in the power grid may also cause the problem of power system security interlocking. This paper discusses the concept of fault safety interlocking system of comprehensive risk control, expounds the interlocking fault model and safety control of power system safety system, and proposes the implementation measures of fault safety interlocking system.

**关键词:** 风险控制; 故障安全连锁系统; 安全控制

**Key words:** risk control; fault safety interlock system; safety control

到目前为止,电力技术人员已经对历史有记录以来的大停电事故的发展过程、原因、发展模式等进行了详细的分析和总结,但是,到目前为止,还没有一个完整的、统一的、行之有效的防范体系,也没有一个比较完整的、完整的解决办法。此前,全球范围内,各国相关部门分别对伴随大停电过程发展而来的系统功角、电压、频率安全稳定,广域保护控制等问题展开了深入的调查研究。为考虑到社会经济发展的需求,在电力系统装置的升级改造阶段等提供切实的保障,帮助制定相应的流程和指南。然而,近年来我国大停电频发,已有基础的电网安全稳定控制理论并不能完全、有效地对电力安全连锁故障进行预防。同时,随着新能源的大量接入,以及新的信息技术、通信控制技术等与传统电力系统的深度融合,也对未来突发的大停电事件的防控提出了更高的要求。所以,在全面风险控制的基础上,对故障安全连锁系统进行了深入的研究。

## 1 基于综合风险控制的故障安全连锁系统的定义

在此基础上,提出了一种基于集成风险控制的故障安全连锁系统。本系统采用连锁控制技术,实现了对可能出现故障的设备、系统的监视与控制,确保了系统的安全性。

在这一体系中,风险集成控制是核心。综合风险是指根据系统的各种因素(如设备状态、环境条件、操作人员行为等)综合评估系统存在的风险情况,在对该体系中存在的各类危险因子进行评价与分析后,就能判断出该体系目前存在的危险程度,从而制定出相应的防范措施。

## 2 电力系统安全连锁故障模型概述

目前,对故障安全连锁系统进行分析 and 研究的难度较大,这主要是因为电网的本质特性是非线性的,对故障安全连锁系统进行理论分析比较困难。大停电是一种由多种偶然性和必然性因素诱发和发展的大停电,很难进行全方位的防范。一次、二次系统以及通讯等多种因素对事故的发展和演变都有一定的影响。针对这一点,电力科研人员已经提出了许多行之有效的解决某一类特征问题的方法模型,把串联故障的研究方法分为两种,一种是宏观系统论方法,另一种是物理过程还原论方法。以自组织临界、复杂网络等为代表的分析方法,主要从全局角度出发;以模式搜索为代表的研究方法,主要通过恢复连锁失效的物理过程。

在此基础上,建立了一种基于事故链预测的连锁故障模型。首先,综合考虑线路自身停运、潮流变换、保护隐藏失效、网络拓扑改变等多种因素对连锁失效风险的影响,建立连锁失效风险评价模型。以可能性的大小来表示。其次,以电网发生连锁故障后的有功损耗(含机组与负荷损耗)为评价指标,并将二者相乘得到系统风险评估结果,以此对电网目前的安全状况进行评估,并对电网安全状况进行评估。事故链预测能真实地反映故障安全连锁系统的关联性、关联性等本质特性,并能依据关联性指标选取较低等级的故障线路,为评价故障安全连锁系统的发生风险提供依据。在此基础上,构建基于多个内部和外部因素共同影响的断电事故链路,实现断电事故链路演化的仿真。在此基础上,本项目拟采用关联指数法,并结合电力网络拓扑结构改变等因素对下一阶故障线路的影响,结合电力网络拓扑结构改变等因素,对下一阶故障线路进行选取,并结合电力网络拓扑结构改变等因素,对下一阶故障线路进行选取。由该模型所模拟得到的初始故障和事故链集合,为后续实施的连锁故障阻塞控制,以及与系统发电机和保护相关因素的配合,提供了一个计算实例。此外,该模型还是协调控制中的一个重要组成部分,为了验证这两个方面,可以保持系统的安全。减少系统损耗的效果为我们提供了借鉴。

## 3 电力系统安全控制概述

“三道防线”是我国电网安全与稳定的重要保障,它是电网安全防护与控制的重要组成部分。准确、及时地实施应急与纠偏控制,以“舍部分而保总体”,是目前我国电力系统相对较弱的一环,虽未出现北美“断电”事件,却也造成了较大的控制成本与社会经济损失。随着新一代智能电网的不断发展,以及近年来新兴技术的兴起与发展,在安全与稳定控制方面的研究一直没有停止过。文献中提及,我国已构建了以预测事故集合为基础的安全防御系统,利用对系统现有的广域控制变量进行调整,对运行方式进行合理安排等措施,实现暂态稳定预警与预防控制的功能,从而达到提升系统暂态和动态稳定性水平的目的。应急控制的应用正由传统的基于离线决策(离线决策,在线匹配)的联切、远切负荷模式,逐渐向基于互联网技术与现代计算机并行计算的“在线预决策,实时匹配”模式转变,以更好的应对不确定性干扰所带来的冲击。在此基础上,依托于广域监控系统,利用同步相移检测单元(PMU)在

关键测点上的高精度、高效率的数据获取,逐步研究面向电力系统的功率角轨线实时预报与瞬态稳定性实时控制方法。

#### 4 基于综合风险控制的故障安全连锁系统的实施

已有的电网安全控制方法大多只针对单一的自然灾害(如冰灾等)或单一的稳定问题(如某一类故障、功角不稳、电压不稳等),而对近年来多个因素导致的大规模停电事件缺乏统一而综合的考虑。电网协同控制不是一种新的控制手段,而是针对电网发生后发生、发展过程更加隐秘、发展机制更加复杂等特点,将已有的防御与控制手段进行更高效的组合,形成一种新型的防护体系。本项目针对当前大断电防护研究仅限于单一类型灾害的缺陷,拟建立复杂灾害下的失效率模型,并进行相应的风险评估,为大断电防护提供科学依据。

在实践中,以电力信息系统深度融合为背景,以此为依据,提出了一种既能保护大电网,又能保护大电网停电的、更深层次、更广领域的安全稳定架构以及实现方法;从而使控制措施的可靠性、经济性和有效性得到了极大的提高。在自己所提出的连锁故障的防御性控制策略中,因为在每一个防御性阶段所要追求的最优控制目标以及所采用的控制手段都是不一样的,因此,如果不能在大停电事故中形成一个比较完整的综合防御性系统,就不能在事故之前就实现防御性的防御性控制。在事故中,进行的阻断控制与改正控制,以及在事故后进行的恢复控制的一整套流程的协调与合作工作,这些工作很可能会造成控制不到位,或者出现循环控制的结果。由于受到模拟模型的限制,本文选择了一个数学上容易实现的优化潮流模型来进行协调控制。

本项目拟从两个角度开展:如何确保协同控制策略自身建模的完备性和精确性,以及如何提高求解速度和精度,即如何在较短的计算时间内得到性能更为优异的单目标解或 Pareto 解集。在此基础上,结合电力设备的热平衡理论,通过引入故障后的定常温度限制,构建了继电保护正常运行后,因负载电流骤然变化而引起的设备热惯性影响下的最优潮流计算模型。在此基础上,将预期故障按出现概率大小分为两类,其中,高概率组的预期故障在最优潮流计算中是一种强制条件,并在此基础上计算出其正常运行所需的费用。在此基础上,对小概率集内的失效进行动态安全区域最优应急控制,计算应急控制措施在此状态下的费用,并将二者结合,建立以系统期望总费用为目标的最优化潮流模型。在此基础上,本项目拟以直流电流为基础,建立具有校正类型安全约束的最优潮流模型。在此基础上,建立了一个基于代价函数的控制动作个数上限的数学模型。上述文献均基于模型本身完备性的影响因素,将进一步丰富安全约束下的最优潮流理论。在计算方法方面,将该模型分解为两个子问题,在求解的过程中,将一个子问题的暂态安全稳定约束转换为另一个 OPF 计算子问题的附加不等式约束,并通过 OPF 与预防控制这两个子问题的“互相解耦,互相迭代”获得 OTS 的解决方案。基于班德斯分合与协调的思路,建立了一套适用于复杂电力系统的安全、稳定数学模型,并给出了相应的求解方法。本项目拟通过对已有 PSCOPF 问题进行可控风险度修正,并结合交替迭代法,将已有的 PSCOPF 问题分解为两个子问题:(1)故障个数更低的 PSCOPF 和(2)常规工况下的潮流两个子问题,并对其求解。在此基础上,本项目拟采用融合演化与内点方法相结合的方法,对具有安全约束的 OPF 问题进行求解,通过对问题的求解,实现对问题的求解,从而提高问题的求解精度与收敛性。采用由高到低的多核平行演算法。在此基础上,提出一种基于并行数值分解的计算方法,通过对该方法进行模拟计算,获得较大的安全失效概率,并对该方法进行改进,使该方法能够在整个工况范围内进行验证。

在此基础上,已有的安全约束下的潮流优化问题仅针对单个故障,而对于多个故障(包括连锁故障)同时出现的情形,未作更深层次的研究。在此基础上,提出了连锁失效对应阶段寻找事故链、确定干扰控制参数、选择干扰时间及干扰位置等关键技术。这给模拟带来了很大的困

难,同时也带来了计算量大、时间长等缺点。在此基础上,利用改进的多目标微粒群优化算法与熵权决策法,构建综合考虑安全与经济的连锁故障协同控制模型。在此基础上,对建立的协同控制模型进行了分析,得出了相应的控制策略。

运用已有的研究结果,对事故链进行了预测,并应用多目标微粒群优化算法,在协同控制模型下求解 Pareto 解集。在此基础上,以系统风险、控制成本等作为评价指标,利用熵权决策理论,并结合调度者的个人偏好,对各协同控制策略集(Pareto 解集)进行评价,以获得给定工况下的最终控制方案。构建模型的思路大体可分为四个部分,即:系统预防与控制、对此状态下的事故链进行预测、对系统阻塞控制、对安全与经济指标的计算。最后,通过构建 IEEE39 仿真平台,对所提模型进行了验证。

从安全性与经济性两个角度出发,对电网链式故障的协调控制进行了研究。

- 1)基于初始机组及负载状况,判断出系统的运行状态,并对系统的初始风险进行了计算。
- 2)对这一状态下的初始失效集进行求解,寻找有可能出现的连锁失效路径,并计算出失效链式失效的概率。
- 3)将 Pareto 解集视为一组控制策略,并将其视为最优控制策略。
- 4)根据调度员对指数的偏爱以及帕累托求解本身的熵权,计算出一组满足条件的最佳控制方案。
- 5)按照该方案对系统的工作状况进行调节,并对其进行比较和判定,以达到降低系统风险的目的。如果下降,则协调控制程序终止。如果没有下降,则继续 3),再次计算。

本项目拟采用多目标多目标规划方法,将多目标规划方法与多目标规划方法相结合,将多目标规划方法与多目标规划方法相结合,构建多目标多目标规划方法。在此基础上,利用熵权决策方法,评估 Pareto 解集合,根据调度者的风险偏好、控制成本等因素,采取多种协同控制策略,以防止连锁失效及事故的扩大。最后,制定出相应的控制策略。

#### 总结

当前,随着大规模互联网的建立,大型电网已经具备了较强的抗单故障能力,部分区域电网在经历 N2 乃至 N3 考验后依然能安全稳定运行的能力。随着坚强智能电网的建设,在线监控与安全防护系统的功能日益完善,电力系统抵抗事故的能力明显提高,但仍有一些事故不能实现 100%的预防与阻断。从波及的范围以及对社会的经济造成的损失来看,都有逐渐加剧的趋势。而且,伴随着大规模可再生能源的接入,特高压交直流系统的建设,以及现代通信信息技术在电力系统监控和安全稳定防御体系中的应用,大停电事故出现了新的、值得关注的发展传播特征。在此基础上,利用改进的多目标微粒群优化算法与熵权决策法,对系统安全性与控制成本进行综合评估,构建兼顾安全与经济的连锁故障协同控制模型,并基于调度员的偏好,提出具有不同风险与控制成本的协同控制策略。经过分析与论证,该方法可在系统正常运转及初始失效前,减少系统连锁失效的风险,且该方法具有较好的安全性与经济性。而且,在危险重要性指数较高的地方执行封锁控制比在其它地方执行封锁控制要好得多。考虑到系统负荷水平和运行模式的影响,通过对安全偏好和经济偏好的合理选择,给出了针对不同负荷水平和运行模式的协同控制方案:当系统的初始运行条件比较苛刻时,可以适当偏爱具有较高安全性的协同控制方案。当系统具有很高的初始安全余量时,调度员可以根据最优的控制策略来减少系统的控制成本。

#### 参考文献:

- [1]李正明;施诗;潘天红;陈武晖.基于灰色关联度和理想解法的电能质量综合评估方法.电力系统保护与控制,2014(12):123-125.
- [2]周波,主编.安全评价技术[M].国防工业出版社.2012.