

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.216190

构建更加坚强电网安全“第一道防线”的探讨

林一峰, 王增平, 王彤, 郑博文

(新能源电力系统国家重点实验室(华北电力大学), 北京 102206)

摘要: 电力系统“三道防线”长期以来为保障电网安全发挥了重要作用, 确保了电力系统遇到各种事故时的安全稳定运行。而继电保护担负着快速可靠切除故障的重任, 是保障电网安全的第一道防线。首先, 介绍了电网发展给“第一道防线”带来的挑战, 分析了传统工频量继电保护内部故障灵敏度不足以及误动和拒动风险并存的原因。其次, 梳理了继电保护应对挑战的措施, 提出了基于故障模型参数特征的保护原理、基于多元信息的广域保护技术和基于暂态量的继电保护方法。最后, 给出了构建更加完善和坚强“第一道防线”的建议。通过加强预防性控制在故障前、后阶段的功能, 阻断继发性连锁故障的发生, 同时加强第一道防线与后续防线的协同, 共同抵御系统性事故的发生。

关键词: 电网安全; 工频量保护; 多元信息; 预防性控制

Discussion on building a stronger first line of defense for grid security

LIN Yifeng, WANG Zengping, WANG Tong, ZHENG Bowen

(State Key Laboratory of Alternate Electrical Power System with Renewable Energy Sources
(North China Electric Power University), Beijing 102206, China)

Abstract: The "three lines of defense" of a power system have played an important role in ensuring the security of the power grid for a long time. This has ensured the safe and stable operation of the power system in the event of various accidents. Relay protection is responsible for fast and reliable fault removal, and is the first line of defense to ensure the safety of the power grid. This paper first introduces the challenges brought by the development of the power grid to the "first line of defense", and analyzes the reasons for the insufficient sensitivity to internal faults of traditional power-frequency relay protection and the coexistence of misoperation and rejection risks. Secondly, it sorts out the measures of relay protection to meet the challenges. A main protection method based on the parameter characteristics of the fault model, wide-area protection technology based on the multi-information and a relay protection method based on the transient quantity are proposed. Finally, suggestions are made for building a more complete and stronger "first line of defense". By strengthening the function of preventive control in the pre-fault and post-fault stages, the occurrence of secondary cascading failures can be blocked, and coordination between the first line of defense and subsequent lines of defense can be strengthened to jointly resist the occurrence of systemic accidents.

This work is supported by the Science and Technology Project of the Headquarters of State Grid Corporation of China (No. 5100-202199529A-0-5-ZN).

Key words: power grid security; power-frequency protection; multi-information; preventive control

0 引言

电力系统安全稳定运行问题是一个关系到社会

稳定和经济发展的世界共性问题, 历来受到各国政府及电力企业的高度关注^[1-2]。电力系统安全保障体系分为“三道防线”, 共同作用保证了电网安全稳定运行, 其示意图如图1所示。

第一道防线: 快速可靠的继电保护措施和有效的预防性控制措施(第一级安全稳定标准)。

第二道防线: 稳定控制装置及切机、切负荷紧

基金项目: 国家电网公司总部科技项目资助(5100-202199529A-0-5-ZN)“新能源电力系统新型后备保护系统研究与应用”

急控制措施(第二级安全稳定标准)。

第三道防线: 失步解列、频率以及电压紧急控制策略(第三级安全稳定标准)^[3]。

近年来, 随着电网联网规模的逐渐扩大、新能源发电比重的迅速增加以及电网跨区域大容量交直流混联形态的逐步形成, 我国电网运行特性发生了较大的变化, 给我国电力系统的安全稳定运行带来了新的挑战^[4]。

本文主要针对三道防线中的“第一道防线”, 从第一道防线面临的挑战、应对挑战采取的措施以及如何构建更加坚强和完善的“第一道防线”等几个方面做出了思考和探讨。



图1 电力系统的“三道防线”

Fig. 1 “Three lines of defense” in power system

1 电网发展给“第一道防线”带来的挑战

“第一道防线”在电力系统安全稳定运行中起到至关重要的作用, 可将“第一道防线”细化为预防性控制和继电保护。

预防性控制: 通过改变电网的运行方式增加有功、无功备用容量等方式满足电网运行的“ $N-1$ ”要求;

继电保护: 通过快速切除故障设备防止故障进一步扩大, 进而为电网的安全稳定运行奠定坚实的基础。

其中, 继电保护作为“第一道防线”的核心, 要求实现故障的快速准确切除, 可以有效提高电网的安全稳定运行水平。目前, 我国电网继电保护正确动作率处于较高水平, 图2为近年来我国220 kV及以上电网保护正确动作率。

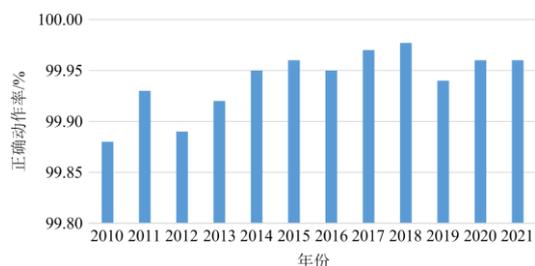


图2 2010—2021年我国220 kV及以上电网继电保护正确动作率

Fig. 2 Correct action rate of relay protection in 220 kV and upper power grids in China from 2010 to 2021

但随着电网改革的加深, 继电保护存在误动和拒动的风险, 严重危害电网的安全稳定运行, 下文将详细分析“第一道防线”面临的挑战。

1.1 我国电网发生深刻变革

随着特高压输电技术大规模应用、高比例可再生能源接入电网以及电力电子设备的广泛应用, 我国已建成世界上规模最大及结构最复杂的电网。电网的快速发展和变革给继电保护带来了严峻挑战。

1.1.1 特高压输电技术大规模应用

我国能源资源与能源消费呈逆向分布, 特别是西南水电、三北(西北、东北、华北北部)风电和光伏发电的大规模开发, 决定了需要实施以电力为重点的能源大范围配置。现有500 kV输电系统的长距离输送能力有限、跨大区电能交换能力和接入新能源能力严重不足, 不能满足清洁能源快速发展和能源大范围配置的需求, 同时输电走廊紧缺、电网短路电流超标等问题愈来愈严重, 客观上要求加快实现电网升级。特高压输电具有容量大、距离远、损耗低、占地少等显著优势, 是解决我国电网和能源发展难题的主要选择^[5]。截止2021年底, 国家电网公司在运特高压交流输电线路达15条、特高压直流输电线路达13条, 同时还有多条特高压输电线路在建, 交直流混联的特征明显。特高压输电线路在具备上述优势的同时所连接的系统短路容量更大, 对系统的稳定影响也大, 给特高压线路继电保护的设计和制造提出了更高的要求^[6]。换流站作为交直流混合电网的枢纽, 区别于传统同步机电源, 故障耦合特性呈现复杂性^[7]。

1.1.2 高比例可再生能源接入

我国可再生能源近年来发展迅猛, 2030年前我国可再生能源的发电量占比将超30%^[8], 如图3所示。

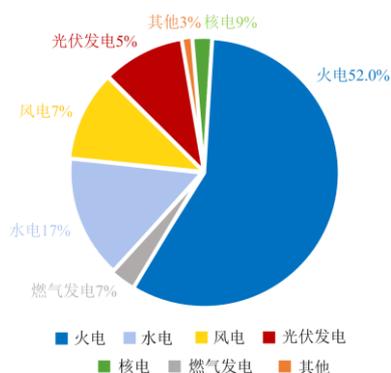


图3 2030年全国发电量占比

Fig. 3 Proportion of electricity generation in China in 2030

大量接入可再生能源已经成为现代电力系统的特征之一, 随之而来的电网谐波问题日益突出^[9]。

同时,当较少可再生能源并网时,由于负荷变化相对有规律,整个电力系统的运行方式相对固定,例如在电力系统规划时,只需要选取不同季节的典型负荷曲线作为参考;而在高比例可再生能源电力系统中,由于源端和荷端存在较大的不确定性,电力系统的运行方式将更加多样化^[10]。

1.1.3 电力电子设备广泛应用

大功率电力电子技术是构建现代电力系统的核心技术之一,电力电子变流器是大多数电力电子设备的关键组件,它具有控制灵活、响应速度快等优点,目前正广泛应用于电力生产、传输和消费等环节^[11]。例如,以风力和光伏发电为代表的新能源电站需通过电力电子变流器实现并网^[12-13];基于电压源型变流器的柔性直流输电技术(Voltage Source Converter Based High Voltage Direct Current transmission, VSC-HVDC)已经应用于区域电网互联工程中^[14];基于电力电子变流器的分布式电源、微电网技术和有源电力滤波器(Active Power Filter, APF)也是近年的研究热点。此外,灵活交流输电(Flexible AC Transmission System, FACTS)技术在输配电环节同样发挥着重要作用,FACTS装置可以提高电力系统的可控性和功率输送能力,例如静止同步补偿器(Static Synchronous Compensator, STATCOM)、静止同步串联补偿器(Static Synchronous Series Compensator, SSSC)和统一潮流控制器(Unified Power Flow Controller, UPFC)等^[15]。可以看出,电力电子变流器正在广泛接入电力系统,并且在未来占比将进一步提升。但高比例电力电子设备接入使电力系统的运行方式和动态特性均发生了明显变化。

1.2 继电保护面临的挑战

继电保护是电网安全“第一道防线”的核心,而电网的发展给继电保护也带来了新的挑战。

现有继电保护以反应工频电气量为主,主保护大多采用差动保护,后备保护沿用定值配合式原理,利用被保护设备自身电气量与定值比较,实现故障识别与切除,保护原理如图4所示。

对于差动保护,随着电网电压等级的升高、电气设备结构愈发复杂,差动保护对线路高阻接地与

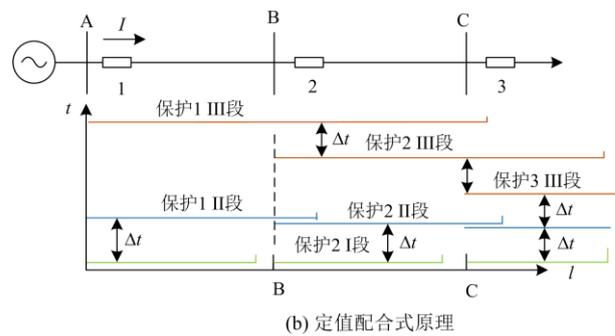


图4 继电保护原理示意图

Fig. 4 Schematic diagram of relay protection principle

变压器匝间短路等内部故障灵敏度不足,可能导致故障无法及时切除,引发变压器着火爆炸事故的发生。而由于电网结构愈发复杂且运行方式多变,定值配合式保护的定值难以整定,保护同时存在误动和拒动的风险:如保护拒动会造成事故影响范围扩大,甚至导致变电站烧毁事故的发生;保护误动则可能引发连锁跳闸,造成大面积停电。国内已发生多起因保护拒动引发的变电站烧毁重大事故(如“6.18”西安 330 kV 南郊站主变烧损事故);国外因保护误动而连锁跳闸造成的多起大停电事故也屡见报道(如“8.14”美加大停电)。

随着新能源发电与直流输电技术的广泛应用,大量电力电子设备接入电网,如图5所示。电力电子器件的非线性、时变以及受控特征,使得电力系统故障后的电气量发生明显畸变,出现大量非周期分量;谐波主要表现为低频分量和非整次分量,其含量基本不随时间而衰减。尤其是交流系统故障容易引发直流换相失败,此时故障暂态过程更加复杂。

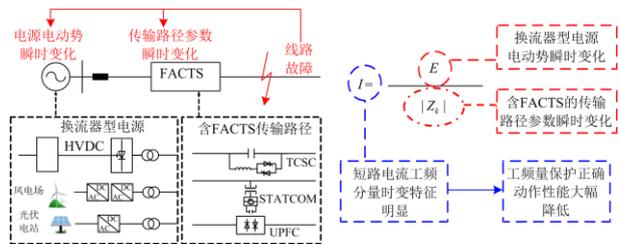
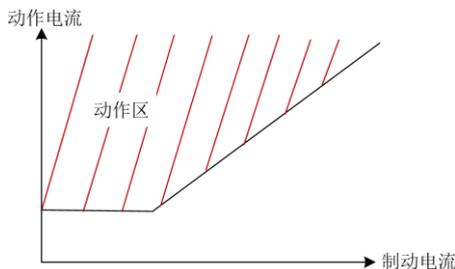


图5 电力电子设备广泛接入电网

Fig. 5 Extensive access of power electronic equipment to power grid

1.3 预防性控制面临的挑战

随着交直流电网混联规模和负荷需求的快速增长,在不确定因素的影响下电网初始故障发生概率增加,故障事件演化的随机性、快速性和全局性等问题日益显著^[16]。同时,特高压电网输送容量大,当系统发生单一元件故障时对电网的冲击巨大,系



(a) 差动保护原理

统预防性控制难以满足电网“ $N-1$ ”的要求; 电力电子设备过流能力低、承受故障冲击能力差, 导致连锁跳闸的场景更多、风险更大, 单个交流系统的简单故障或者单个换流站的异常动态过程都可能诱发多换流站同时换相失败、直流系统单极、双极闭锁等连锁故障的发生, 表现出了交直流混联电网的复杂耦合特性。以图 6 为例, 交流线路故障引发直流换相失败, 进而导致连锁故障, 是常见的场景之一。

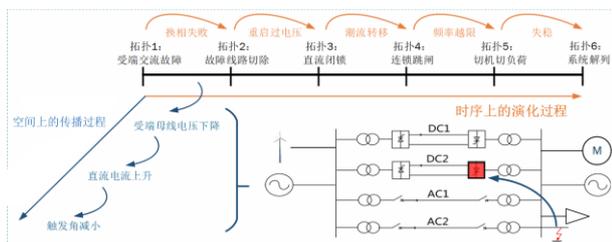


图 6 连锁故障发展过程示意图

Fig. 6 Schematic diagram of interlocking fault development process

在连锁故障发生场景愈发多样化的情况下, 事故预想在线匹配难度增大。由于新能源发电出力随机波动, 电网的运行方式变化快、变化大, 使得事故预想和当前工况存在差距。同时电力电子设备的应用使实时仿真计算维度更大, 准确度降低, 控制策略的快速性和黑匣子特征使得离线预案的工作量增加, 适用性降低。

2 继电保护应对挑战的措施

上述问题给现有继电保护的原理、工作模式和反应工频电气量的特征带来了根本性挑战, 需要采用相应的措施提升继电保护的动作性能, 加强“第一道防线”保障电网安全运行的能力。

本文分别从故障模型参数在故障与非故障情况下的特征差异、利用广域保护中的信息多样性以及可快速识别故障的暂态量保护出发, 提出了可快速准确识别系统故障的保护方法, 优化现有保护性能, 避免单一故障向系统性连锁故障发展, 保证了电网的安全稳定运行。

2.1 基于故障模型参数特征的继电保护原理

现有电气设备主保护以差动保护为主, 仅能够反应故障外在表现特征, 在变压器匝间短路及线路高阻接地等轻微故障的情况下, 外部故障与内部故障特征差异不明显, 易造成保护拒动, 因此需要深入挖掘和利用故障的本源信息, 建立反应故障特征的高灵敏模型, 优化系统主保护功能。

利用故障全过程电气量信息, 计及 CT 误差、

变压器有载调压对保护的影响, 实时计算变压器各相等效漏感参数的变化量及三相不一致程度, 利用等效漏感参数变化特征可实现变压器内部故障快速识别, 判别方法为: 在内部故障的情况下, 绕组变形将会导致漏电感参数发生变化; 而在正常运行、外部故障和励磁涌流情况下, 变压器漏电感等内部结构参数不会发生改变^[17], 如图 7 所示。

该方法不受励磁涌流的影响, 能够迅速、可靠地切除变压器内部故障, 对轻微故障也有足够的灵敏度, 可作为差动保护的补充, 有效提高主保护的动作性能。

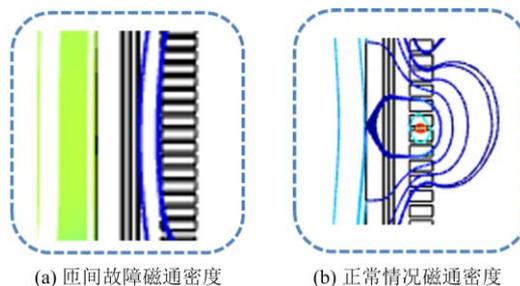


图 7 基于等效漏感参数变化特征的变压器主保护

Fig. 7 Transformer main protection based on variation characteristics of equivalent leakage inductance parameters

2.2 基于多元信息的广域保护技术

传统保护仅利用保护安装处的信息进行故障判别, 信息量少, 在交直流混联以及可再生能源大规模接入的环境下难以兼顾保护选择性、灵敏性和快速性的要求。其解决方案为充分利用电网中的多点多元信息, 构建广域保护的信息融合机制以及新型保护系统。

目前主要的广域保护系统结构分为 3 类。

1) 广域集中式系统结构。其优点是广域主机覆盖范围为整个广域电网, 通过汇集广域全网信息进行故障判别; 缺点是保护结构复杂, 对通信、主机的要求高, 而且保护的可靠性和快速性无法保证。

2) 有限广域集中式系统结构。其优点是将整个广域电网划分为多个区域, 并且设置站域主站, 在站内获取该区域信息实现故障判别和指令下达; 缺点是区域划分存在重叠, 区域间通信复杂且系统改造升级困难。

3) 完全分布式系统结构。其优点是以各保护装置为独立决策单元, 同时与临近保护装置交互信息, 保护构成模式灵活; 缺点是系统结构过于复杂, 信息交互量巨大, 同时装置间协调难度大, 扩容和改造升级困难。

综合上述广域保护构成模式特点, 可采用基于

站域集中-站间分布式的信息融合机制,作为前述功能的载体,实现保护功能与信息融合的协调优化,同时全面提升主、后备保护性能,解决定值配合式保护定值难以整定的问题。

该结构的构成模式如图 8 所示,在变电站内汇集交、直流母线电气量及直流控制逻辑量等站域信息,实现交直流系统以及保护与控制信息的融合;在相邻变电站间信息分布对等交互,实现后备保护功能以及对连锁故障发生的抑制。

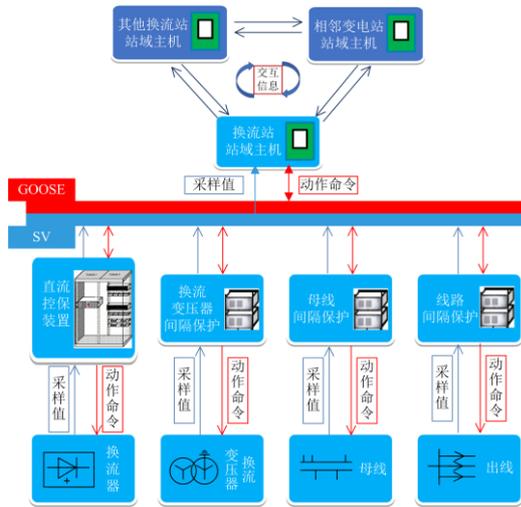


图 8 站域集中-站间分布式保护构成模式

Fig. 8 Composition mode of station domain centralized-inter-station distributed protection system

利用该新型保护系统,为解决现有保护定值难以整定的情况,可利用站间逻辑量信息一致性特征构成后备保护方案。利用逻辑量对故障反应的交叉重叠特征,根据动作一致性原则,既可实现故障设备的快速准确识别,又可从根本上攻克系统振荡及过负荷造成保护误动的难题。如图 9,线路 L5 的故

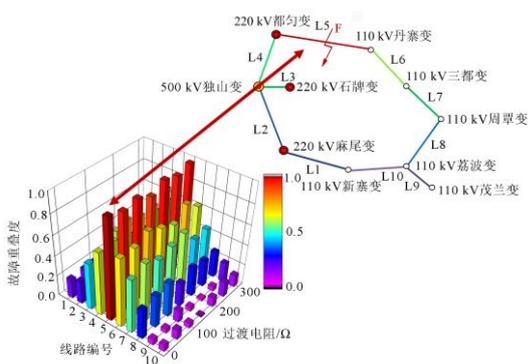


图 9 基于站间逻辑量信息一致性特征的后备保护技术
Fig. 9 Backup protection technology based on the consistency feature of inter-station logical quantity information

障重叠程度最高,故判别为该线路上发生了故障。在判别出故障位置后,由站域主机直接向本端及对端断路器发送跳闸指令实现保护快速动作以及故障切除,避免了逐级配合式保护延时长的问题。

基于站间逻辑量信息的后备保护技术可实现近后备保护全范围速动,有效缩短了后备保护延时;在原理上保证了对相邻元件故障反应的灵敏性,避免了后备保护拒动导致的重大事故发生;不受系统振荡和过负荷影响,避免了保护误动引发的连锁跳闸和系统性事故发生。

2.3 基于暂态量的继电保护方法

在电力电子设备大规模接入电网的前提下,基于工频电气量的保护方法难以保证其动作的准确性;而故障后的暂态量中蕴含着丰富的故障特征信息,故基于暂态量的电力电子化系统保护将成为解决这一问题的突破口[18-20]。

电力系统发生故障后的暂态是由分布/集中参数的电容、电感等储能元件及电力电子装置快速响应所引起的电气量过渡过程。随着电压等级升高,系统规模不断扩大,电气设备结构复杂,故障暂态响应呈现出更加复杂的时间尺度特性,如图 10 所示。

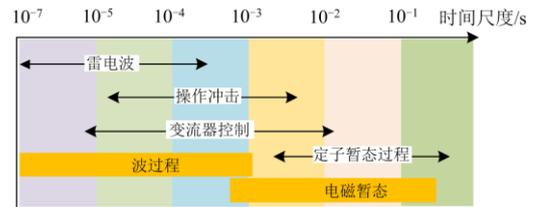


图 10 故障暂态时间尺度分布特性

Fig. 10 Fault transient time scale distribution characteristics

发掘故障暂态特征,构建由初始行波、暂态量、工频突变量到工频稳态的故障全过程保护系统,是实现故障快速准确切除的有效手段。

如利用小波能量熵提取母线关联出线保护处故障暂态特征,并进行横向相对值比较,可识别故障方向。基于线路两侧故障逻辑信号,能识别区内、外及母线故障,避免 UPFC 等 FACTS 元件对传统暂态量保护的不利影响[20];母线各出线保护启动后,以各保护安装处小波能量熵累加和 $\sum W_{i,ee}$ 为计量值,在发生区内故障与区外故障时,保护安装处所求取的小波能量熵累加和差异明显,以此形成保护判据,可有效识别故障方向,如图 11 所示。

以保护 3(R₃)为例,发生区内故障(F₁)与区外故障(F₅)时,计算得出的小波能量熵累加和差异明显,由图 12 可知:发生区内故障时的累加值会远远大于区外故障时的累加值,故障的暂态差异明显,由此判据构成的保护方案可有效识别区内与区外故障[22]。

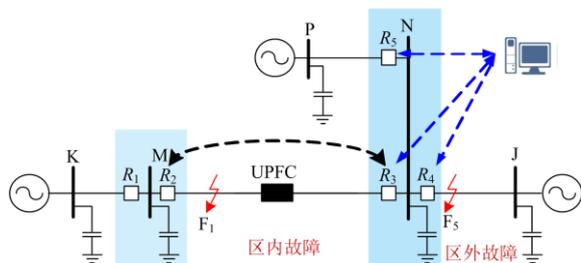


图 11 500 kV 系统仿真模型

Fig. 11 500 kV power system simulation model

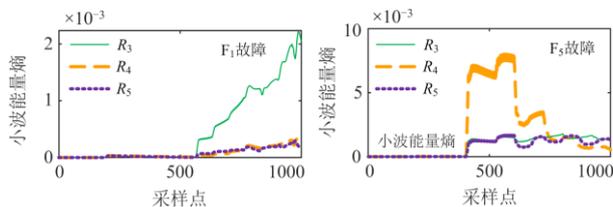


图 12 保护安装处小波能量熵累加和

Fig. 12 Summation of wavelet energy entropy

at protective installation

3 构建更加完善和坚强的“第一道防线”

3.1 加强预防性控制在“第一道防线”中的作用

特高压输电通道的建设以及大规模波动性新能源并网, 通过现有预防性控制很难做到全部满足“N-1”要求, 或者需要付出巨大的经济代价, 如降低特高压线路的输送容量。

图 13 为电力系统稳定控制阶段示意图, 解决这一问题的重要环节在于进一步完善预防性控制在事故前、事故后阶段的功能, 尽可能抑制直流换相失败乃至直流闭锁和引发潮流转移造成连锁跳闸事故的发生, 尽可能保证电网在极端情况下的安全。

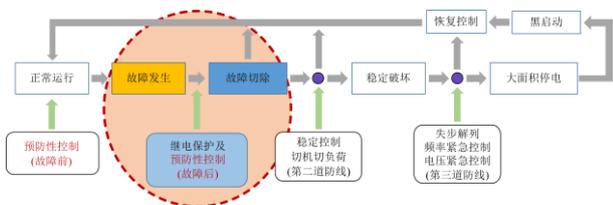


图 13 电力系统稳定控制阶段示意图

Fig. 13 Schematic diagram of power system

stability control stage

3.2 加强事故后预防性控制的研究

常规直流发生换相失败可能导致直流闭锁, 引发连锁性故障的风险加剧。通过对换相失败的预测和控制, 可以有效抑制故障的进一步发展, 阻断并发性连锁跳闸的发生。

比较直流换相需求面积 S_{need} 与可供应最小换相

面积 S_{min} 的大小, 可实现对换相失败的预测; 当预判出可能发生换相失败时, 投入提前换相提前触发控制策略, 减小逆变侧触发角大小, 通过提前开始换相过程的策略避免换相失败的发生^[23], 如图 14 和图 15 所示。

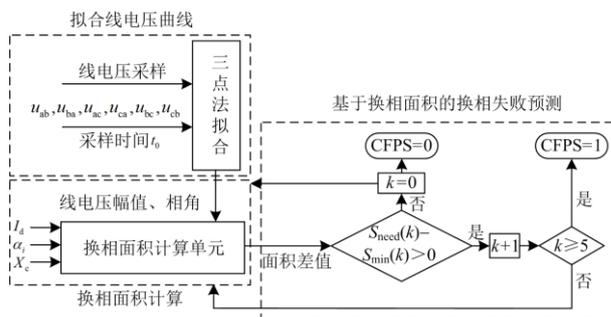


图 14 基于换相面积的换相失败预测

Fig. 14 Prediction of commutation failure based on commutation-area

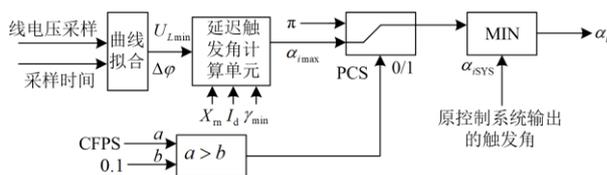


图 15 换相过程提前触发控制

Fig. 15 Advanced firing control of commutation process

由于故障发生后, 仅靠继电保护动作难以全部满足电力系统“N-1”的要求, 为了防止故障进一步扩大导致继发性连锁跳闸, 可以采取分层次快速、精准切机/切负荷控制, 阻断连锁跳闸的发生^[24], 如图 16 和图 17 所示。

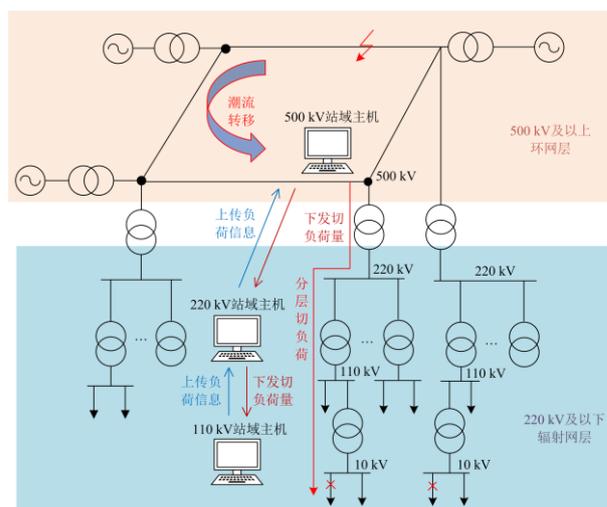


图 16 层次化精准切机切负荷系统

Fig. 16 Hierarchical precise generator and load-shedding system

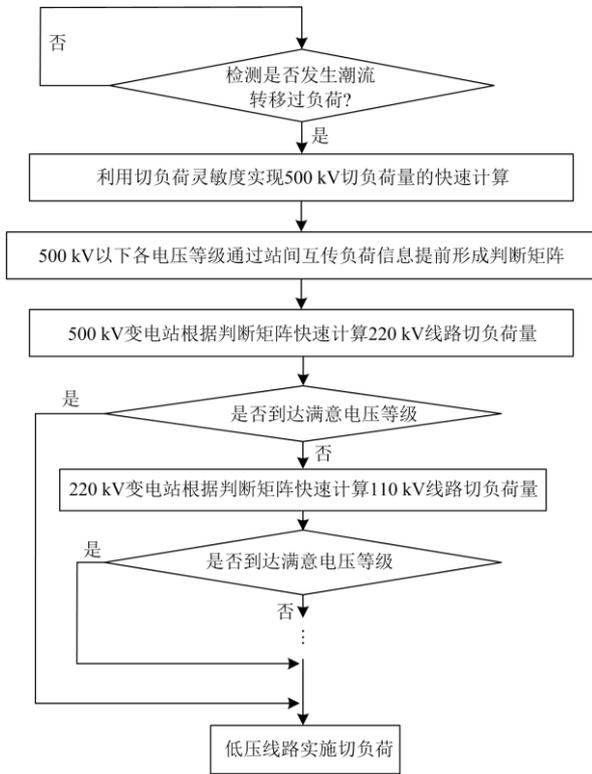


图 17 层次化精准切机切负荷流程图
Fig. 17 Flow chart of hierarchical precise generator and load-shedding

3.3 加强事故前预防性控制的研究

仅针对故障后的预防措施进行研究，无法完全避免事故的发生，故也需要加强对故障前预防措施的研究，为紧急情况下电网的灾变事故做好预案^[25]。如要做好严重自然灾害(台风、地震等)和战争情况下电网的多重故障系统性灾变事故预案，找准电网的“重点”和“弱点”，采取必要的“化整为零”(系统解列)、“以退为进”措施，防止电网发生系统性灾难，如图 18 所示。

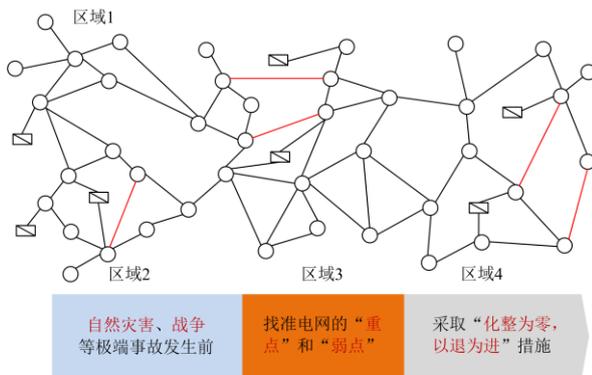


图 18 系统性灾变事故预案

Fig. 18 Systematic disaster contingency pre-arranged planning

3.4 加强“第一道防线”与后续防线的协同

构建保护与控制的信息交互机制，建立基于故障全息(故障时间、位置、类型、接地电阻等)的严重程度量化方法，实现一、二道防线由传统的“事件驱动”向“信息驱动”转变，为后续稳定控制提供了准确依据，该方法的研究思路如图 19 所示。

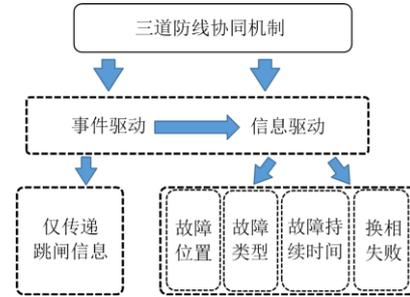


图 19 事件驱动转换为信息驱动

Fig. 19 Event-driven transforming into information-driven

以系统暂态稳定性评估方法为例，传统暂态稳定评估方法仅按照线路两端发生三相短路持续固定时间(如 100 ms)进行判断和计算，其结果往往过于保守。基于站域保护故障全景信息的电力系统暂态稳定分析方法，将包含故障类型、故障位置及接地电阻等在内的故障全景信息提炼到故障中系统的收缩导纳矩阵中，进而求得不同故障场景下系统的暂态稳定边界，可有效提高暂稳判断的精确度^[26]，如图 20 所示。

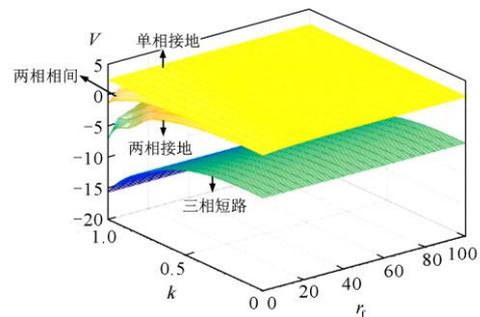


图 20 不同故障场景下系统暂态稳定裕度曲面

Fig. 20 System transient stability margin surface in different fault scenarios

4 结论

随着电网的发展，单一设备故障会给系统带来巨大冲击，电力电子设备的故障脆弱性引起并发性或连锁性故障的机会增多，均增大了系统性事故的风险。

为了保证电网的安全稳定运行，需要构建更加完善和坚强的“第一道防线”。

1) 从继电保护的角度出发, 应深入挖掘系统故障后的本源故障特征, 建立能够灵敏反应系统故障的模型, 实现对内部轻微故障的准确识别。同时, 利用广域保护系统获取故障多元信息并进行简单交互, 根据不同位置保护逻辑量反应故障的差异化特征逻辑量信息一致性识别, 解决传统定值配合式保护整定难的问题。由于故障的暂态过程同样包含了大量故障信息, 通过合理利用故障全过程信息可以大幅度提升继电保护的可靠性。

2) 从预防性控制的角度出发, 加强故障前(系统正常运行时)、故障后(故障发生后)阶段的控制功能, 阻断连锁故障的发生, 尽可能避免系统向失稳的方向运行; 同时做好紧急情况下的灾变事故预案, 必要时采取“化整为零”、“以退为进”的措施, 通过第一道防线和后续防线的协同, 防止电网发生系统性的灾难。

从继电保护和预防性控制的角度出发, 构建更加坚强的电网安全“第一道防线”, 可以起到抵御系统性事故的“桥头堡”作用。

参考文献

- [1] 汤涌. 电力系统安全稳定综合防御体系框架[J]. 电网技术, 2012, 36(8): 1-5.
TANG Yong. Framework of comprehensive defense architecture for power system security and stability[J]. Power System Technology, 2012, 36(8): 1-5.
- [2] 舒印彪, 张文亮, 周孝信, 等. 特高压同步电网安全性评估[J]. 中国电机工程学报, 2007, 27(34): 1-6.
SHU Yinbiao, ZHANG Wenliang, ZHOU Xiaoxin, et al. Security evaluation of UHV synchronized power grid[J]. Proceedings of the CSEE, 2007, 27(34): 1-6.
- [3] 电力系统安全稳定导则: DL 755—2001[S].
- [4] 刘振亚. 中国电力与能源[M]. 北京: 中国电力出版社, 2012.
- [5] 刘振亚. 中国特高压交流输电技术创新[J]. 电网技术, 2013, 37(3): 567-574.
LIU Zhenya. Innovation of UHVAC transmission technology in China[J]. Power System Technology, 2013, 37(3): 567-574.
- [6] 董新洲, 苏斌, 薄志谦, 等. 特高压输电线路继电保护特殊问题的研究[J]. 电力系统自动化, 2004, 28(22): 19-22.
DONG Xinzhou, SU Bin, BO Zhiqian, et al. Study of special problems on protective relaying of UHV transmission line[J]. Automation of Electric Power Systems, 2004, 28(22): 19-22.
- [7] 侯俊杰, 宋国兵, 徐瑞东, 等. 交直流混合电网故障耦合特性分析与继电保护研究[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(14): 176-187.
- HOU Junjie, SONG Guobing, XU Ruidong, et al. Fault coupling characteristic analysis and relay protection research on an AC/DC hybrid power grid[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(14): 176-187.
- [8] 国家发改委能源研究所. 中国 2050 高比例可再生能源发展情景暨途径研究[R]. 2015.
- [9] 陈思源, 景巍巍, 史明明, 等. 新能源接入背景下的谐波源建模方法综述[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(7): 162-175.
CHEN Siyuan, JING Weiwei, SHI Mingming, et al. Review of harmonic source modeling methods with the background of renewable energy access[J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(7): 162-175.
- [10] 康重庆, 姚良忠. 高比例可再生能源电力系统的关键科学问题与理论研究框架[J]. 电力系统自动化, 2017, 41(9): 2-11.
KANG Chongqing, YAO Liangzhong. Key scientific issues and theoretical research framework for power systems with high proportion of renewable energy[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(9): 2-11.
- [11] 姜齐荣, 王亮, 谢小荣. 电力电子化电力系统的振荡问题及其抑制措施研究[J]. 高电压技术, 2017, 43(4): 1057-1066.
JIANG Qirong, WANG Liang, XIE Xiaorong. Study on oscillations of power-electronized power system and their mitigation schemes[J]. High Voltage Engineering, 2017, 43(4): 1057-1066.
- [12] 姚致清, 于飞, 赵倩, 等. 基于模块化多电平换流器的大型光伏并网系统仿真研究[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(36): 27-33.
YAO Zhiqing, YU Fei, ZHAO Qian, et al. Simulation research on large-scale PV grid-connected systems based on MMC[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(36): 27-33.
- [13] 李建林, 高志刚, 胡书举, 等. 并联背靠背 PWM 变流器在直驱型风力发电系统的应用[J]. 电力系统自动化, 2008, 32(5): 59-62.
LI Jianlin, GAO Zhigang, HU Shuju, et al. Application of parallel back-to-back PWM converter on the direct-drive wind power system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2008, 32(5): 59-62.
- [14] 王志新, 吴杰, 徐烈, 等. 大型海上风电场并网 VSC-HVDC 变流器关键技术[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(19): 14-26.
WANG Zhixin, WU Jie, XU Lie, et al. Key technologies of large offshore wind farm VSC-HVDC converters for grid integration[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(19): 14-26.

- [15] 姜齐荣, 王玉芝. 电力电子设备高占比电力系统电磁振荡分析与抑制综述[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(22): 7185-7201.
JIANG Qirong, WANG Yuzhi. Overview of the analysis and mitigation methods of electromagnetic oscillations in power systems with high proportion of power electronic equipment[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(22): 7185-7201.
- [16] 付蓉, 蒋国平, 王保云. 计及系统连锁故障风险的电网预防控制[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(3): 12-17.
FU Rong, JIANG Guoping, WANG Baoyun. A preventive control strategy for power grid considering system cascading failure risk[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(3): 12-17.
- [17] 马静, 王增平, 王雪. 基于等效瞬时漏电感的变压器保护新原理[J]. 电力系统自动化, 2006, 30(23): 64-68, 103.
MA Jing, WANG Zengping, WANG Xue. Novel principle of power transformer protection based on equivalent instantaneous leakage inductance[J]. Automation of Electric Power Systems, 2006, 30(23): 64-68, 103.
- [18] 田培涛, 陈勇, 吴庆范, 等. 基于柔直电网的暂态量保护方案及配合策略研究[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(14): 1-8.
TIAN Peitao, CHEN Yong, WU Qingfan, et al. Study on transient-based protection scheme and cooperation strategy based on flexible DC grid[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(14): 1-8.
- [19] 张悻宁, 陈可傲, 罗易萍, 等. 基于暂态电流相关系数的混合多端高压直流输电线路保护[J]. 电力建设, 2021, 42(5): 113-121.
ZHANG Yining, CHEN Keao, LUO Yiping, et al. Hybrid multi-terminal HVDC transmission line protection based on transient current correlation coefficient[J]. Electric Power Construction, 2021, 42(5): 113-121.
- [20] 王杨正, 杨建明, 鲁江, 等. 配置 HSS 的并联多端高压直流输电线路保护选择性研究[J]. 电力工程技术, 2020, 39(1): 95-102.
WANG Yangzheng, YANG Jianming, LU Jiang, et al. Line protection selectivity of the parallel multi-terminal HVDC with HSS[J]. Electric Power Engineering Technology, 2020, 39(1): 95-102.
- [21] 郑博文, 王增平, 吕哲, 等. 基于暂态量的继电保护研究[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(22): 18-25.
ZHENG Bowen, WANG Zengping, LÜ Zhe, et al. Research on transient-based relay protection[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(22): 18-25.
- [22] 吕哲, 王增平, 许琬昱, 等. 基于母线关联出线暂态频谱信息的 UPFC 线路纵联保护[J]. 电力系统自动化, 2020, 44(2): 139-146.
LÜ Zhe, WANG Zengping, XU Wanyu, et al. Pilot protection of UPFC line based on transient spectrum information of busbar-connected outgoing lines[J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(2): 139-146.
- [23] 王增平, 刘席洋, 郑博文, 等. 基于电压波形拟合的换相失败快速预测与抑制措施[J]. 电工技术学报, 2020, 35(7): 1454-1463.
WANG Zengping, LIU Xiyang, ZHENG Bowen, et al. The research on fast prediction and suppression measures of commutation failure based on voltage waveform fitting[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2020, 35(7): 1454-1463.
- [24] 王增平, 朱劭璇, 王彤, 等. 受端电网分层优化切负荷策略[J]. 电工技术学报, 2020, 35(5): 1128-1139.
WANG Zengping, ZHU Shaoxuan, WANG Tong, et al. Research on stratified optimal load shedding strategy for receiving end power grid[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2020, 35(5): 1128-1139.
- [25] 张保会. 加强继电保护与紧急控制系统的研究提高互联电网安全防御能力[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(7): 5-10.
ZHANG Baohui. Strengthen the protection relay and urgency control systems to improve the capability of security in the interconnected power network[J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(7): 5-10.
- [26] 王增平, 朱劭璇, 王彤, 等. 基于故障全景信息的电力系统暂态稳定分析方法[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(15): 34-42.
WANG Zengping, ZHU Shaoxuan, WANG Tong, et al. Transient stability analysis for a power system based on fault panoramic information[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(15): 34-42.

收稿日期: 2022-02-07; 修回日期: 2022-05-05

作者简介:

林一峰(1992—), 男, 博士研究生, 研究方向为电力系统继电保护与控制; E-mail: lyf3172@126.com

王增平(1964—), 男, 通信作者, 博士, 教授, 研究方向为电力系统自动化、继电保护; E-mail: wangzp1103@sina.com

王彤(1985—), 女, 博士, 副教授, 研究方向为新能源电力系统稳定分析与控制。E-mail: hdwangtong@126.com

(编辑 姜新丽)