

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.236103

电力系统继电保护与安全控制面临的挑战与应对措施

王增平, 林一峰, 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: 高比例波动性新能源接入电网、交直流特高压远距离输电以及大量电力电子设备的应用给现有电网继电保护和安全控制带来严峻挑战。电网发展对现有技术带来困难的同时也对我国长期以来形成的电力系统“三道防线”安全防御体系提出了更高的要求。首先, 详细分析了电力系统继电保护与安全控制系统在新型电网环境下面临的各种挑战及其形成原因。然后, 归纳总结了能够应对这些挑战的有利环境基础与技术条件, 并为技术与科学研究指明了方向。最后, 探讨了新型保护的工作模式、保护新原理、保护信息共享、保护与电网安全控制的协同技术、电网预防性控制功能, 并建立了实现信息共享且能良好适用新技术的“区域协同+分布自治”新型电力系统安全防御体系。

关键词: 电网安全; 继电保护; 多元信息; 协同控制

Challenges and countermeasures to power system relay protection and safety control

WANG Zengping, LIN Yifeng, 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 high proportion of volatile renewable energy sources connected to the power grid, the long-distance transmission of AC and DC ultra-high voltage and the application of bulk power electronic devices bring serious challenges to existing power grid relay protection and safety control. They also put forward higher requirements for the "three defense lines" layout which has been established in power systems for decades. First, the challenges faced by the power system relay protection and security control system in the new grid environment and their causes are analyzed in detail. Then, this paper summarizes the favorable environmental basis and technical conditions that can meet these challenges, and points out the direction for technological development and scientific research. Finally, the working mode of the new protection, the new protection principle, the protection information sharing, the cooperation technology between the protection and the power grid security control, and the preventive control functions of the power grid are discussed and studied. A new power system security defense system of "regional cooperation + distributed autonomy" is established, one which realizes information sharing and can well apply the new technology.

This work is supported by the National Natural Science Foundation of China (No. U22B6006).

Key words: power grid security; relay protection; multi-information; cooperative control

0 引言

我国能源转型快速发展, 高比例可再生能源大量接入电网, 截至 2021 年底新能源发电装机已达 6.86 亿 kW, 为实现“双碳”战略目标, 预计到 2030 年, 新能源发电装机容量将达到 18.2 亿 kW, 占装

总容量的 49.2%^[1-4]。高比例新能源的强波动性、时空随机性给电力系统安全稳定运行带来巨大挑战^[5]。

为适应一次能源与电力负荷逆向分布的国情, 我国采用远距离交直流特高压输电技术成为必然选择。截至 2021 年底, 在运特高压交流输电线路 15 条、特高压直流输电线路 18 条, 特高压输电、交直流互联的特大型电网格局已经形成^[6-8]。特高压线路故障对电网造成很大冲击, 对继电保护和安全稳定

基金项目: 国家自然科学基金项目资助(U22B6006); 国家电网公司总部科技项目资助(5100-202199529A-0-5-ZN)

控制提出了更高的要求。

为实现不同形态电能的转换和提高电网输电的灵活性,在电网的源端、网侧和负荷侧都采用了大量的电力电子设备。电力电子设备与传统铁芯线圈设备相比,故障承受能力大大下降,同时故障时控制策略的快速变化也加剧了故障过程的复杂性^[9]。

我国三道防线安全防御体系最早是在 20 世纪 80 年代初提出的,为当时应对各类电网事故、确保电网安全稳定运行和可靠供电发挥了重要作用^[10]。随着大机组投运、区域电网互联、电力体制改革以及建设特高压电网等形势的发展,我国电网安全稳定运行不断面临新情况,安全稳定三道防线体系以及相应的技术规范和导则也在不断发展和完善,确保了我国电网 40 多年来未发生大的系统性事故^[11]。但是,传统三道防线防御体系面向的对象还是以同步机为主的交流电力系统,主要针对的是阶段性特征比较明显、发展轨迹也相对确定的系统性事故,是一种按故障发展程度递进式的纵深防御体系。同时,三道防线专业特征明显,各功能独立配置,尚未形成相互协调和有机统一的机制。新型电力系统的故障特征、耦合机理、交互影响和演化路径与传统交流系统相比有很大不同,电网安全运行的形势更加复杂、严峻,系统性事故的风险更大,迫切需要在继电保护与电网安全控制方面形成信息融合和功能协同机制^[12]。

本文分析了新型电力系统发展给继电保护和安安全控制带来的挑战,提出了应对挑战的一些思考和建议。

1 电力系统发展对继电保护和安全控制的影响分析

1.1 对继电保护的影响

1) 现有保护面临的难题将更加复杂

特高压交直流输电,导致电气主设备结构更加复杂,内部匝间短路的故障特征将更加不明显,保护的灵敏度进一步降低^[13];特高压输电通道停运引起潮流转移过负荷更严重,更易引起保护误动;新能源的故障弱馈特征,在并网线路发生过渡电阻接地故障时,导致保护反应过渡电阻的能力进一步下降;大量电力电子设备应用引发的系统宽频振荡,导致保护面临的不正常工况更多,保护误动的几率增大^[14]。

2) 保护的定值整定和配合更加困难

定值配合式保护作为继电保护系统的重要组成部分,担负着被保护设备近后备和相邻元件远后备保护的重任。随着波动性、高比例的新能源接入电

网,系统的运行方式变化更大更快,电网的自愈控制还会直接改变电网的拓扑结构,定值配合式保护仅利用保护安装处信息,某些情况下将无法正确识别区内外故障,保护不误动和不拒动的要求无法同时兼顾,定值难以整定。同时后备保护动作时间长,难以满足系统安全稳定运行的要求且受系统振荡和过负荷影响,易造成连锁跳闸,甚至造成系统性事故^[15]。

3) 工频量保护原理受到挑战

逆变型电源耐受短路电流能力差,提供的工频短路电流比传统同步发电机降低很多,短路电流中低频和非整次谐波含量大,也给工频量的计算精度带来严重影响,导致反应工频量保护的灵敏性降低。另外,无论是逆变型电源还是短路回路中的电力电子设备(如串补线路 TCSC),在故障过程中为保护自身安全可能会快速改变控制策略,甚至会改变其拓扑结构,使得故障具有复杂多样的快速时变特征,给工频量保护的故障识别带来困难。还有,工频量保护因算法数据窗长限制,其固有动作时间长,已不能满足电力电子设备快速切除故障的要求。这些因素使得基于工频量的保护原理受到了严峻挑战^[16]。

1.2 对安全控制的影响

1) 连锁故障发生的场景更多

LCC 型直流输电技术在我国获得广泛应用,但逆变侧需要电压支撑才能完成正常换相,在交流系统发生故障时,由于电压的畸变,可能引发单个或多个直流换相失败,对电力系统而言,相当于在原有故障基础上叠加另一个或多个复故障,称为并发性故障($N-M$)。另外,由于系统中电力电子设备对故障的敏感度高,但耐受故障能力差,同时电力电子化的电力系统呈现自治化的倾向,还会造成多个元件因故障相继退出运行的情况,称之为继发性故障($N-1-2-\dots-M$)。例如,交流故障引发换相失败,导致直流闭锁,可能在送端和受端相继引发过压、低压脱网的现象,以及因潮流转移再引发的过负荷问题。并发性故障和继发性故障统称为连锁故障,其发生的场景多,蔓延速度快,发展路径多样,造成系统性事故的风险更大^[17]。

2) 预案式控制准确性和适用性降低

事先做好控制策略的预案,事发后匹配预案执行,是当前电力系统实现安全稳定控制的主要手段。随着新能源发电占比和电力电子设备占比的逐步增加,一方面由于新能源的波动特征,要通过源、网、荷、储的协同,实现系统有功和无功实时平衡,造成系统运行方式变化大、变化快,导致预案式控制实时“跟踪”系统变化的效果变差;另一方面,电

力电子设备的模型呈现非线性、时变特征,使电力系统呈现更强的连续-离散系统特性,同时现阶段还存在模型参数不精准、控制策略不透明的“黑匣子”现象,造成预案式控制策略制定更加困难,准确度也会降低。

3) 多种系统稳定问题交织

大量新能源经特高压直流跨区域输送,当传输通道故障时,会造成很大的有功和无功功率的波动和不平衡,并且造成风电、光伏与直流输电系统的动态特性叠加,可能会同时引发系统功角稳定、频率稳定、电压稳定和过负荷等多个问题^[18]。如图 1、图 2 所示,在大规模新能源接入的交直流互联大电网中,如果某一特高压直流线路故障,送端系统外送通道受阻,将导致大规模潮流转移,极易造成其他外送通道重载,区域间潮流断面越限风险激增。受端系统有可能出现大量功率缺额,从而产生频率下降,甚至触发低频减载动作,引起事故扩大,如图 2(a);送端系统将产生大功率盈余,一方面导致区域 A 频率攀升,如图 2(b),另一方面区域 A、B 间同步机组/群会发生功角摇摆,如图 2(c),如控制措施不能有效抑制,甚至会导致功角失稳最终发生失步,最终导致两区域解列。同时,区域电网内交流联络线重载,电流增大,无功需求增加也极易导致区域电网低压解列,如图 2(d)。

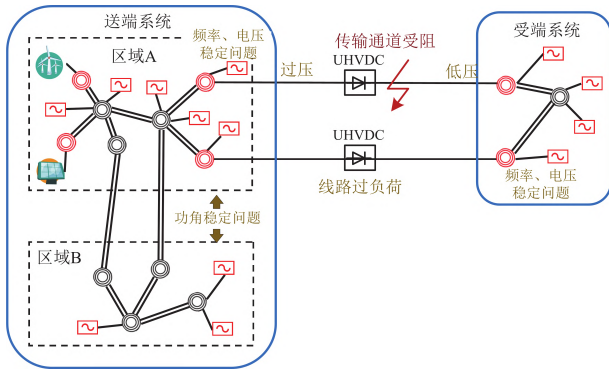
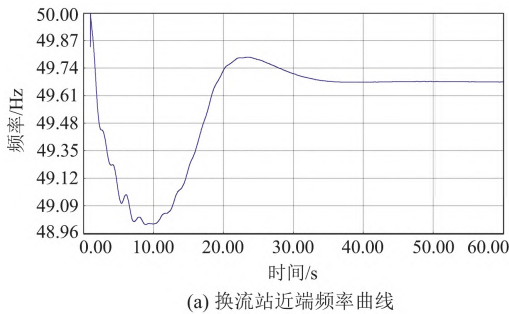
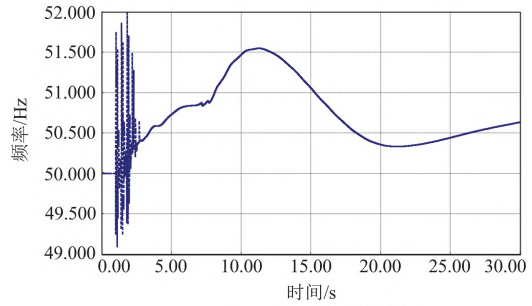


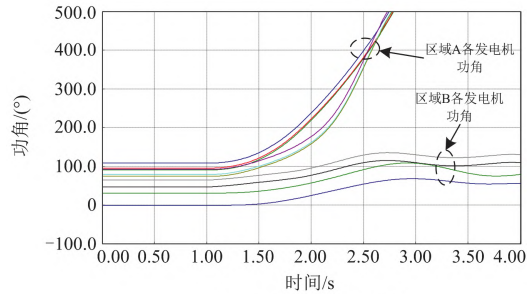
图 1 含大量新能源、交直流互联的大电网系统
Fig. 1 Large power system with bulk renewable energy and AC/DC hybrid



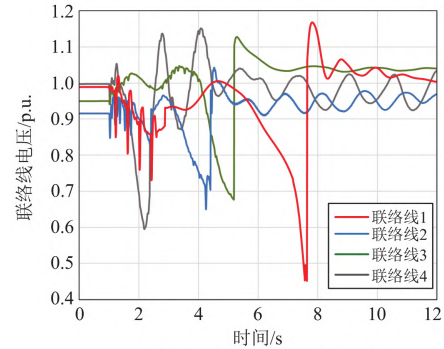
(a) 换流站近端频率曲线



(b) 送端系统频率曲线



(c) 区域 A、B 功角曲线



(d) 区域 A 内各联络线电压曲线

图 2 多种稳定问题交织

Fig. 2 Multiple stability issues intertwined

还需要说明的是,多种稳定问题交织在一起,更需要解决问题的系统性思维方法,传统解决单一稳定问题的措施可能会对另一种问题起到恶化作用。例如在“风火打捆”直流外送系统的送端通常同时存在功角稳定问题和暂态过电压问题,换相失败期间直流系统运行曲线如图 3 所示。当逆变侧短路引发直流系统换相失败后,由于直流电流突增,导致整流器无功消耗增大,可能引起送端风电机组低穿现象,随着低压限流器投入运行,直流电流被抑制下来。但在换相失败结束瞬间,直流电流的进一步减小又造成送端暂态过电压^[19-20]。通过提升系统短路容量(配套电源、大容量调相机)可降低因低穿引起的暂态过电压,但同时会降低送端系统的功角稳定水平^[21]。

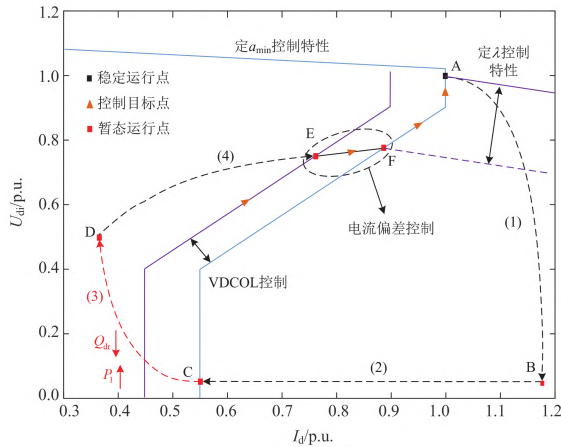


图 3 换相失败期间直流运行曲线图

Fig. 3 DC operation curve during commutation failure

4) 次/超同步振荡、谐波振荡等场景不断增多
电力系统在谐波振荡方面呈现以下特征:

(1) 电力电子设备的波形变换及其非线性控制过程必然要产生大量的谐波, 造成电网含有更加丰富的谐波源。

(2) 电网的柔性输电技术改变电网的电路参数, 同时叠加电力电子控制策略的作用, 使得电路的谐振频率更加宽泛。

(3) 水电、风电机组的动力机械系统在低/超低频率可能呈现负阻尼特性, 导致机械-电气系统共振。因此, 电网谐波源以及多种弱阻尼或负阻尼的谐波传播路径导致电网振荡场景更多, 影响因素更加复杂, 分析与控制难度也更大, 严重威胁系统的安全稳定运行^[22-23]。如图 4, 2015 年 7 月 1 日新疆哈密山北风电场发生次同步振荡, 导致 300 km 外的花园电厂 3 台火电机组轴系扭振跳闸。

5) 电网切机策略更加复杂、解列约束条件更多

新能源电源接入电网的分布化特征以及有功、无功功率的分裂输出控制, 导致事故状态下系统频率、电压分布与同步机为主的电网发生很大的变化。如图 5、图 6 所示, 电网发生故障后, 系统频率和电压的分布相反, 与同步发电机为主传统电网的电压、频率满足集中统一分布的规律有很大不同, 如果按照传统频率、电压异常进行切机、切负荷控制, 将会出现不正确动作。并且新能源的波动性及分布式并网需要保证解列后各区域功率平衡, 能够保持稳定运行, 使得解列的约束条件更多, 策略更加复杂多样^[24-25]。

6) 极端条件对电网破坏的外部风险增大

近年来, 受气候变化的影响, 台风、暴雨等极

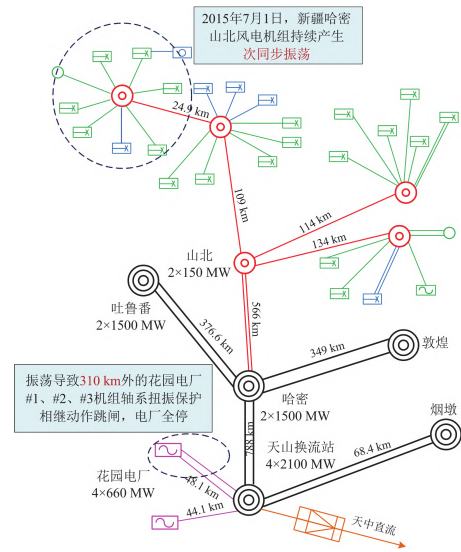


图 4 花园电厂次同步振荡

Fig. 4 Sub-synchronous oscillation of Huayuan plant

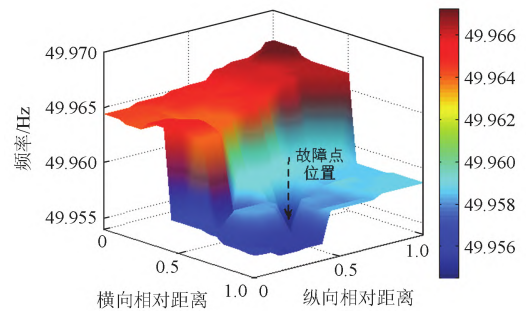


图 5 故障点频率到达最低点时各观测点频率空间分布
Fig. 5 Frequency distribution of each point when the fault point reaches the lowest frequency

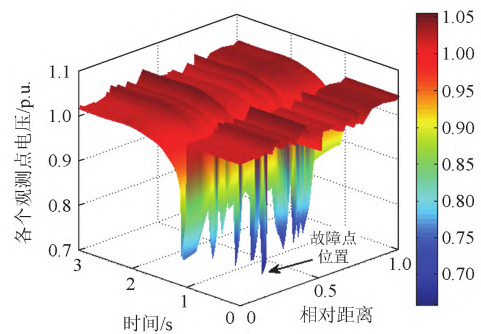


图 6 故障期间各个观测点电压空间分布

Fig. 6 Voltage distribution of each observation point

端天气条件增多, 对电力系统形成了较大的破坏。同时国际形势也日趋紧张, 电网也成为战争重点打击的目标。我国电网联网规模越来越大, 电压等级越来越高, 面对外部可能多个元件 ($N-K$) 同时停

运的风险，大的系统性停电事故风险也明显增大。现有三道防线中第一道防线的预防性控制发挥作用还不够明显，在事前控制付出的代价比事后通过第二道或第三道防线控制的代价低的情况下，就可以积极发挥预防性控制的作用^[26]。目前亟需加强第一道防线中的预防性控制研究，使电力系统能充分利用现有资源满足极端情况下的安全要求。

2 应对挑战的有利条件

电力系统快速转型发展的同时，来自其内部和外部的各种技术也在日臻完善，为应对挑战提供了诸多有利条件。

2.1 “大云物移智链”等技术的应用

互联网技术具有传输速度快、可靠性高、低时延等优势，为电网数据互联提供了重要技术支撑。随着电网“双高”特性的凸显，无论是继电保护还是安全控制，都需要获得更多的信息才能做到准确动作。电力物联网通过信息将电力系统的一次、二次设备广泛互联，可以获取电力系统设备的全方位信息，实现设备在线状态感知和健康水平评估。大数据技术通过建立电力大数据聚合模型，通过数据分析、挖掘等技术获取数据中隐性特征，实现系统运行状态的快速感知。

电力系统云计算通过分布式、并行计算的方式提升大系统的整体在线分析计算能力，可以提升保护与安全控制的协同能力，实现保护与控制的整体功能优化。区块链技术构建的去中心化信任系统和数据分析系统，可以实现区域内保护与控制信息的高效共享并极大地保障了信息的安全性。

人工智能是新型电力系统的关键支撑技术，在多维数据、非线性、强随机性、深度耦合的电力系统场景下，相比于传统的解析分析和模型驱动具有更大优势，可以通过数据驱动高度抽象和表达系统的内在规律。人工智能技术在故障识别、稳定判断等领域可以更加全面、精确地刻画故障状态和演化规律。

电网的物理系统与信息系统高度融合是实现电网智能化发展的必然要求。“大云物移智链”是新型电力系统能量流基础上的“神经系统”，是保障系统安全、高效运行不可或缺的重要组成部分^[27-30]。

2.2 充分发挥电力电子设备故障处理的协同能力

电力电子设备故障承受能力低，故障中快速时变的控制策略增加了故障过程的复杂性，给保护与控制都造成了不良影响。为应对这些不良影响，在新能源场站中增加虚拟阻尼和虚拟惯性控制等功能，以提高系统的抑制振荡能力和风电场的惯性水平^[31]；在交流系统故障引发直流换相失败方面，根

据故障严重程度自适应改变换流器的触发角，以避免或降低换相失败发生的概率^[32]。如何充分挖掘电力电子设备灵活、快速的调节能力，让其发挥应对故障的积极作用，也还有很大的空间。如在故障过程中通过电力电子设备产生特有的故障分量，可以提高保护对故障的反应能力；故障切除后，通过电力电子设备的快速调节和协同配合，改变电网参数或拓扑结构，可以迅速改善有功、无功分布，消除电压异常和设备过载现象，有效抑制连锁故障的发生。

2.3 分布式电源为区域独立运行提供支撑

风电和光伏以分布式电源接入配电网也是我国可再生能源利用的一种重要途径。分布式电源接入配电网在提高能源利用率的同时，也增加了电网运行的韧性。如图 7，在极端情况下，电网可以解列为由分布式电源为主支撑的几个局部孤网。

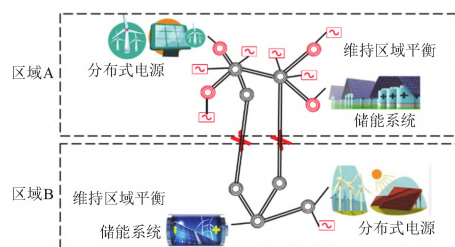


图 7 分布式电源支持区域独立运行

Fig. 7 Distributed power supports area independent operation

2.4 多类型储能为新型电力系统发展提供支撑

新能源占比不断提升，强随机性给电网安全稳定运行带来挑战，储能作为电网中的优质灵活性调节资源，同时具有电源和负荷的双重属性，是解决新能源出力快速波动问题的必然选择。储能技术在发输配环节均被广泛应用，综合考虑多种类型储能的技术、经济特点，利用各技术优势互补，开展多类型储能系统的选型、容量优化配置和协调控制，以提高新能源的消纳能力，是储能技术的重要研究方向^[33]。但无论是功率型还是能量型储能设备，对电网的暂态和动态过程将产生明显的影响，也会影响继电保护和安全控制的性能，必须予以考虑。

3 应对挑战的思考与建议

3.1 加强对新型电力系统故障特征和传播特性的研究

电力电子设备呈现很强的非线性特征，在故障过程中其控制策略甚至拓扑结构快速时变，新型电力系统的故障特征发生了深刻的变化，原有的故障分析方法也不再适用。新能源及电力电子设备的控制策略与电网保护控制交互影响，系统故障呈现多时空耦合、多尺度级联特征，连锁故障发生的场景

更多, 路径更复杂。新能源源端多种不同工况、不同容量、不同类型的机组汇聚, 其故障反应差异也很大, 如何准确描述源端的集聚效应也是需要重点研究的问题。同时, 电力电子设备暂态电热耦合响应及承受故障能力的边界条件还尚不清晰, 如何充分发挥其故障主动抑制能力, 并通过与电网保护的协同配合, 减少并发性和继发性故障的发生也需要进一步研究。

3.2 构建基于信息融合的继电保护新型工作模式

针对传统定值配合式保护灵敏度不足、难以配合、动作时间长等问题, 破除仅利用保护本地信息的局限, 通过信息交互融合是解决现有保护问题的根本出路。因此, 探索基于信息交互融合的新型保护工作模式, 已成为保障电网安全的重大现实需求。

实现信息融合的继电保护新型工作模式重点考虑以下因素:

- 1) 应以满足保护“四性”为基本要求;
- 2) 信息融合主要适用于后备保护, 且与主保护相对独立;
- 3) 因现实条件限制, 不应强依赖于广域同步测量系统;
- 4) 充分考虑信息传输的可靠性和时延情况, 本地信息与广域信息相互校验, 提升可靠性;
- 5) 具备良好的工程实用性, 适应运维规程、规范要求, 易于系统的改造升级以及系统扩容;
- 6) 保护配置原则是实现近后备和远后备保护功能, 信息交互范围为本站和相邻站。

站域集中-站间分布式保护构成模式如图 8 所示, 在本变电站内汇集交、直流电气量及直流控制

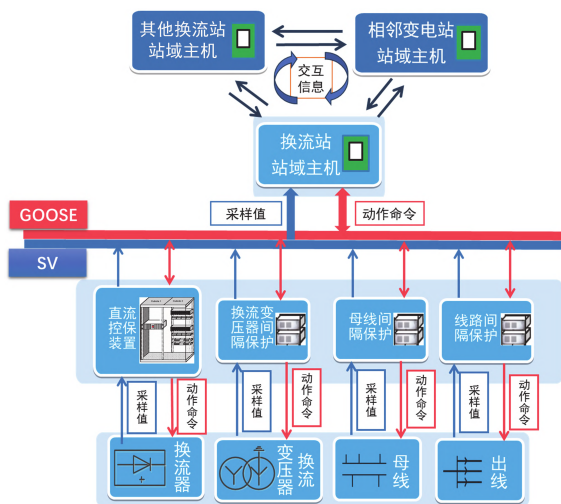


图 8 站域集中-站间分布式保护构成模式

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

逻辑量等站域信息, 实现本变电站范围内故障的切除以及保护和控制信息的融合。本站与相邻变电站通过分布对等的方式交互信息, 实现线路保护与远后备保护功能。

基于信息融合的后备保护可以实现近后备动作时间小于 100 ms(信息交互时间和保护固有动作时间), 远后备动作时间小于 0.5 s, 有效缩短后备保护的时延。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; 保护不受系统振荡和过负荷影响, 避免了其误动引发的连锁跳闸和系统性事故发生。

3.3 基于故障全过程的快速保护原理

仅仅利用工频量保护原理已不能满足电力电子设备大规模接入电网后系统安全的要求。故障全过程是指从故障发生到故障稳态的整个阶段, 其中包含了故障初始行波、行波折反射产生的暂态高频量、电感电容集中储能元件过渡过程等多种暂态量信息, 这些暂态信息与故障点位置、类型等故障信息有直接关联关系。充分挖掘和利用故障全过程的暂态信息, 实现基于暂态量的保护原理有利于提升保护动作的准确性和快速性。

利用故障初始行波波头特征的行波保护已开展了多年的研究。下面举例说明利用行波折反射产生的高频信号构成暂态量保护。

1) 暂态差动电流保护

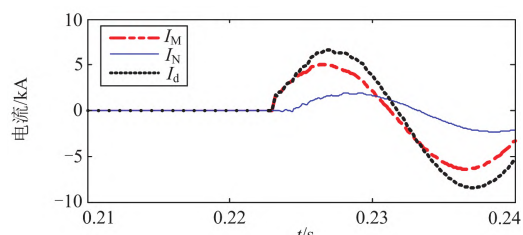
对暂态差动电流的频率特征进行分析, 发现区内外故障时的故障分量差动电流的频率特征存在明显差异。如图 9 所示, 利用最小二乘拟合法提取差动电流暂态波形的主频率^[34], 区内故障时, 差动电流以工频短路电流为主, 差动电流拟合的频率呈低频, 近似为 50 Hz; 区外故障时各相的差动电流则含有更多的高频分量, 远大于 50 Hz。因此, 可以依据暂态差动电流的波动频率识别区内外故障, 从而构成线路暂态差动保护原理。

2) 暂态方向保护

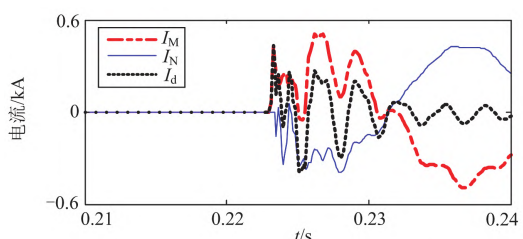
在超/特高压交流系统中, 由于母线存在对地杂散电容以及连接多个元件, 当线路发生故障时, 行波在母线处要发生折反射和透射现象。故障线路主要为故障点与母线间的折反射行波, 非故障线路则主要为故障线路透射过去的行波, 两者的能量和频率特性都有较大的差别。通过小波分析对高频暂态分量进行特征提取, 利用小波能量熵量化分析故障和非故障线路电流的高频能量密度, 如图 10 所示,

故障线路的小波能量熵值要远大于非故障线路。通过比较同一母线连接元件的小波能量熵值就可以判别区内外故障方向^[35]。

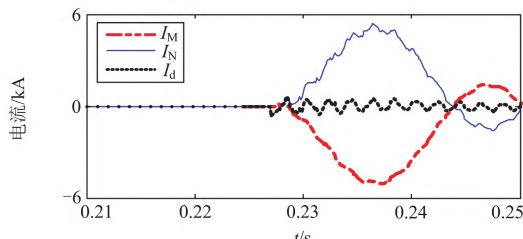
需要说明的是,利用故障暂态全过程的信息不可避免要考虑因故障导致电力电子设备控制策略变化对暂态过程的影响。同时,要加强暂态信息经互感器、二次电缆以及保护装置等环节传变影响的研究。



(a) 区内故障时故障相电流分量



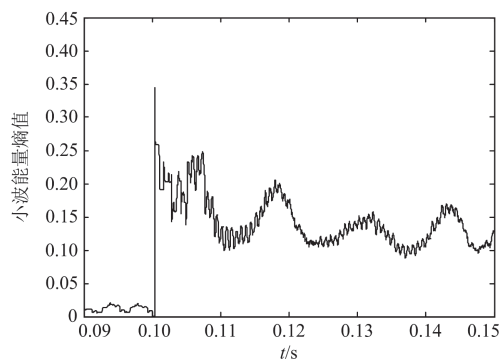
(b) 区内故障时非故障相电流分量



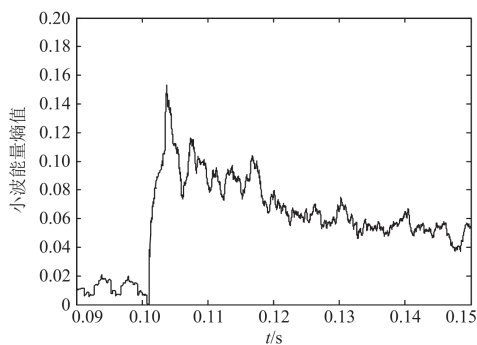
(c) 区外故障时各相电流分量

图9 区内外故障时故障暂态差动电流

Fig. 9 Fault transient differential currents at different locations of faults



(a) 区内故障



(b) 区外故障

图10 区内外故障小波能量熵值

Fig. 10 Summation of wavelet energy entropy at protective installation

3.4 加强继电保护资源的利用

继电保护装置覆盖了 10 kV 及以上电压等级的所有设备和线路,运行不间断,可靠性要求高,掌握短路前、中、后的所有故障信息。继电保护与其他控制系统(设备)的信息联系,如果仅仅停留在“继电保护跳闸”开关量信息层面,则信息资源存在极大浪费。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母线节点发生三相短路,故障切除时间 100 ms 进行计算和判断,其评估结果必然趋于保守。如果将故障类型、故障位置及故障实际切除时间等故障全景信息运用到稳定判别中,则可以得到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^[36],如图 11 所示。图中 V = 减速面积-加速面积, k = 故障位置/线路全长, r_f 为接电阻。切机/切负荷控制也可以实现由传统“事件驱动”转换为“数据驱动”,融合故障信息,可以根据故障后系统的暂态稳定裕度,计算系统的切机/切负荷的灵敏度及切机/切负荷量,再将切机/切负荷控制策略按网络拓扑连接方式分层精准实施。

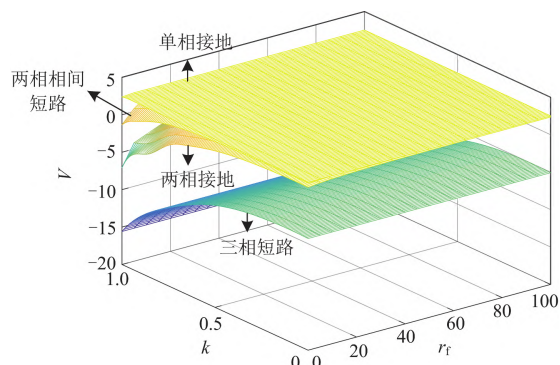


图11 不同故障场景下系统暂态稳定裕度曲面

Fig. 11 System transient stability margin surface in different fault scenarios

3.5 构建三道防线协同机制

传统三道防线之间相互割裂配置, 防线间以“事件告知”或“事态发展”的方式交互驱动, 没有形成一体化的防御体系。新型电力系统故障后可能造成多个安全问题交织在一起, 事态发展也不再有明显的时间阶段特征, 这造成三道防线间不存在“缓冲”地带, 三道防线的功能也更加紧密联系。三道防线间迫切需要建立沟通融合机制, 由传统的“事件告知”或“事态发展”驱动, 转变为信息驱动方式。

根据电力系统安全防御所实现的功能, 其体系框架是“区域协同+分布自治”模式, 如图 12 所示。换流站、变电站以及新能源站通过采集本站的信息并与相邻站交互信息, 实现场站自治的保护控制功能(这些保护、控制功能仅需要来自本站及相邻变电站)。设置区域集中控制主站, 集中本区域的有关信息, 主要实现该区域内需要整体协同的各种稳定控制, 同时具备与上一级集中控制系统的信息交互能力, 实现更广泛的控制功能。

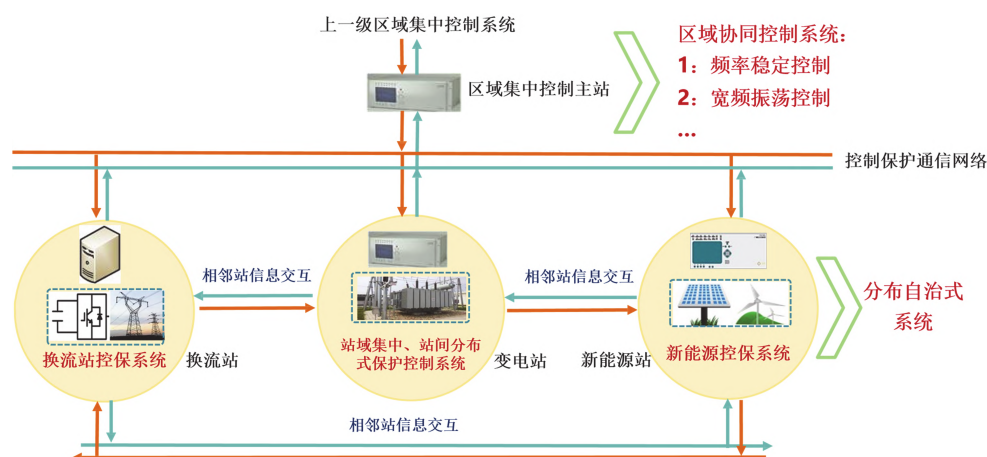


图 12 区域协同+分布自治防御体系架构

Fig. 12 Architecture of regional collaboration + distributed autonomous defense system

分布自治系统: 通过采集本变电站及相邻站的故障信息, 实现快速、准确的控制保护功能, 同时也是协同控制系统的信息采集和执行单元。自治区域包含本站以及相邻变电站。通过站内以及相邻站信息的融合, 可以进一步强化电网保护和电力电子设备控保的协同, 进一步提升近后备、远后备保护的性能, 同时实现保护控制在极端情况下(如通信网络中断)的保底控制能力。

区域协同机制: 区域主站采集各变电站处理和“筛检”后的信息, 完成需要集中决策的各种控制功能。由于可以采集到来自继电保护的故障持续时间、类型、位置等故障信息, 可以方便实现“三道防线”的融合与协同。同时, 当区域主机完成本区域直流控制及总的切机、切负荷控制决策后, 可以通过与各变电站的控制协同完成直流功率的快速调整和精准的切机、切负荷控制。

3.6 加强电网极端条件下的预防性控制功能

极端天气等外部灾害给电网带来的风险正在逐年增长, 也成为造成系统性事故的主要原因。目前电网主要通过继电保护切除故障和后续的第二、第三道防线应对极端条件对电网的影响, 在第一道防

线的预防性控制却几乎没有发挥作用。应该做好电网在极端条件下的风险评估和应急预案, 必要时采取主动控制措施, 有效防止系统性事故。以台风、暴雨灾害为例, 首先建立台风、暴雨的灾害模型, 刻画台风暴雨的风雨荷载等物理特性, 利用气象部门对台风、暴雨灾害的预测信息, 结合输电设备的结构可靠性模型, 计算台风暴雨灾害下的输电设备损毁概率, 从而有效评估电网发生 $N-k$ 事故的风险。基于系统的安全稳定运行要求, 建立电网 $N-k$ 事故风险评估体系, 刻画极端条件下系统的风险水平, 并提出风险等级量化方法, 为电网应对极端条件的控制提供有力的决策依据。研究预防性控制策略, 考虑停电损失、功率平衡、孤岛存活率等多种约束条件, 从而在极端条件下将大电网解裂成若干个可以安全运行的独立电网^[37]。在极端条件下, 采用第一道防线的预防性控制, 相比第二、第三道防线的灾后控制会具有更好的控制效果和更低的控制代价。

4 结论

新型电力系统的快速发展给电力系统安全带来

了严峻挑战,必须对新型电力系统的故障分析方法、继电保护原理、工作模式和系统安全控制进行变革。在故障特性分析方面,要着重考虑电力电子设备控制策略、网络拓扑故障时变和新能源场群聚集效应的影响;在继电保护方面,为提高保护的動作速度和减小弱工频故障对保护的影响,必须挖掘和利用故障暂态信息,同时利用多元信息减小保护对定值的依赖;在系统安全控制方面,需要研究系统性事故发生的场景和发展路径,通过保护和控制的协同配合有效阻抑连锁故障的发生和发展,构建功能更加完备的安全防御体系,为我国新型电力系统安全稳定运行保驾护航。

参考文献

- [1] 国家能源局. 1-7 月份全国电力工业统计数据[EB/OL]. [2022-08-19]. http://www.nea.gov.cn/2022-08/19/c_1310653994.htm.
- [2] 谭显东, 刘俊, 徐志成, 等. “双碳”目标下“十四五”电力供需形势[J]. 中国电力, 2021, 54(5): 1-6.
TAN Xiandong, LIU Jun, XU Zhicheng, et al. Power supply and demand balance during the 14th five-year plan period under the goal of carbon emission peak and carbon neutrality[J]. Electric Power, 2021, 54(5): 1-6.
- [3] 刘浩芳, 朱艺颖, 刘琳, 等. 新能源机组的电网强度适应性及暂态响应特性测试方案[J]. 电力系统自动化, 2022, 46(21): 179-185.
LIU Haofang, ZHU Yiyang, LIU Lin, et al. Test scheme for power grid strength adaptability and transient response characteristics of renewable energy unit[J]. Automation of Electric Power Systems, 2022, 46(21): 179-185.
- [4] 杨立滨, 张磊, 刘艳章, 等. 基于分布式框架的新能源场站并网性能评估[J]. 电力建设, 2022, 43(5): 137-144.
YANG Libin, ZHANG Lei, LIU Yanzhang, et al. Grid-connection performance evaluation of renewable energy station under distributed framework[J]. Electric Power Construction, 2022, 43(5): 137-144.
- [5] 张军六, 李佳朋, 唐震, 等. 基于本地测量的高比例新能源电力系统不平衡功率估算与附加功率控制策略[J]. 电力科学与技术学报, 2022, 37(3): 50-60.
ZHANG Junliu, LI Jiapeng, TANG Zhen, et al. Local measurement based unbalanced active power estimation and supplementary power modulation for power systems with high proportions of renewable energy[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2022, 37(3): 50-60.
- [6] 赵会茹, 赵一航, 王路瑶, 等. 基于贝叶斯最优最劣和改进物元可拓的特高压输电工程综合效益评价[J]. 中国电力, 2022, 55(6): 161-171.
ZHAO Huiru, ZHAO Yihang, WANG Luyao, et al. Comprehensive performance evaluation of UHV power transmission project based on Bayesian best-worst method and improved matter-element extension model[J]. Electric Power, 2022, 55(6): 161-171.
- [7] 国家电网. 电网业务一特高压[EB/OL]. http://www.sgcc.com.cn/html/sgcc_main/.
- [8] 王骅, 李相俊, 李文启, 等. 分布式储能系统对特高压直流闭锁后的紧急功率支撑方法研究[J]. 供用电, 2021, 38(6): 14-20.
WANG Hua, LI Xiangjun, LI Wenqi, et al. Research on emergency power support method of distributed energy storage system after UHVDC blockage[J]. Distribution & Utilization, 2021, 38(6): 14-20.
- [9] 刘依晗, 王宇飞. 新型电力系统中跨域连锁故障的演化机理与主动防御探索[J]. 中国电力, 2022, 55(2): 62-72, 81.
LIU Yihan, WANG Yufei. Exploring the evolution mechanism and active defense of cross-domain cascading failures in new type power system[J]. Electric Power, 2022, 55(2): 62-72, 81.
- [10] 电力系统安全稳定导则: DL 755—2001[S].
- [11] 李亚楼, 张星, 胡善华, 等. 含高比例电力电子设备电力系统安全稳定分析建模仿真技术[J]. 电力系统自动化, 2022, 46(10): 33-42.
LI Yalou, ZHANG Xing, HU Shanhua, et al. Modeling and simulation technology for stability analysis of power system with high proportion of power electronics[J]. Automation of Electric Power Systems, 2022, 46(10): 33-42.
- [12] JOLHE S P, DHOMANE G A, KARALKAR M D. Design of protection and control scheme for hybrid nanogrid[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2022, 46(10): 33-42.
- [13] 乔小敏, 王增平, 文俊. 高压直流输电中谐波对换流变压器差动保护的影响[J]. 电力系统保护与控制, 2009, 37(10): 111-114.
QIAO Xiaomin, WANG Zengping, WEN Jun. Influence of converter transformer differential protection by harmonic in HVDC transmission system[J]. Power System Protection and Control, 2009, 37(10): 111-114.
- [14] ERDIWANSYAH, MAHIDIN, HUSIN H, et al. A critical review of the integration of renewable energy sources with various technologies[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2021, 6(1): 37-54.
- [15] 张烈, 王德林, 刘亚东, 等. 国家电网 220 kV 及以上交流保护十年运行分析[J]. 电网技术, 2017, 41(5): 1654-1659.

- ZHANG Lie, WANG Delin, LIU Yadong, et al. Analysis on protective relaying and its operation conditions in 220 kV and above AC system of SGCC in past ten years[J]. Power System Technology, 2017, 41(5): 1654-1659.
- [16] 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.
- [17] SALAMA H S, MAGDY G, BAKEER A. Adaptive coordination control strategy of renewable energy sources, hydrogen production unit, and fuel cell for frequency regulation of a hybrid distributed power system[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2022, 7(3): 472-489.
- [18] 王增平, 胡加伟, 王彤, 等. 大容量直流换相失败后功率恢复速率对送端系统暂态稳定的影响分析[J]. 电网技术, 2020, 44(5): 1815-1825.
- WANG Zengping, HU Jiawei, WANG Tong, et al. Analysis of impact of power recovery speed on transient stability of sending-side system after large capacity HVDC commutation failure[J]. Power System Technology, 2020, 44(5): 1815-1825.
- [19] 屠竞哲, 张健, 刘明松, 等. 考虑风机动态特性的大扰动暂态过电压机理分析[J]. 电力系统自动化, 2020, 44(11): 197-205.
- TU Jingzhe, ZHANG Jian, LIU Mingsong, et al. Mechanism analysis of transient overvoltage with large disturbance considering dynamic characteristics of wind generator[J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(11): 197-205.
- [20] WANG Tong, LIN Pei, WANG Jiaming, et al. Overvoltage suppression under commutation failure based on improved voltage-dependent current order limiter control strategy[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2022, 58(4): 4914-4922.
- [21] 邱威, 贺静波, 樊小伟, 等. 应对特高压直流大扰动的稳定措施综述[J]. 电网技术, 2022, 46(8): 3049-3067.
- QIU Wei, HE Jingbo, FAN Xiaowei, et al. Overview on stability measures for large disturbances of UHVDC[J]. Power System Technology, 2022, 46(8): 3049-3067.
- [22] 王晖, 李莹, 李文锋, 等. 并网逆变器复合电流环引起次/超同步振荡机理研究[J]. 电网技术, 2017, 41(4): 1061-1067.
- WANG Hui, LI Ying, LI Wenfeng, et al. Mechanism research of subsynchronous and supersynchronous oscillations caused by compound current loop of grid-connected inverter[J]. Power System Technology, 2017, 41(4): 1061-1067.
- [23] 叶海峰, 李智, 徐斌, 等. 电力系统传动转矩控制器低频振荡控制方法研究[J]. 电网与清洁能源, 2022, 38(1): 76-81.
- YE Haifeng, LI Zhi, XU Bin, et al. Research on low frequency oscillation control methods of power system transmission torque controller[J]. Power System and Clean Energy, 2022, 38(1): 76-81.
- [24] 相禹维, 王彤, 李聪聪, 等. 面向大容量直流闭锁的暂态稳定紧急切机控制策略研究[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(15): 84-92.
- XIANG Yuwei, WANG Tong, LI Congcong, et al. Strategy of emergency generator tripping control for transient stability after a large capacity HVDC blocking fault[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(15): 84-92.
- [25] 汪昭辰, 王增平, 相禹维, 等. 基于拓扑连通性约束遗传算法的主动解列断面搜索[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(21): 149-156.
- WANG Zhaochen, WANG Zengping, XIANG Yuwei, et al. Intentional islanding section searching based on a genetic algorithm with a topological connectivity constraint[J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(21): 149-156.
- [26] 周晓敏, 葛少云, 李腾, 等. 极端天气条件下的配电网韧性分析方法及提升措施研究[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(2): 505-513, 681.
- ZHOU Xiaomin, GE Shaoyun, LI Teng, et al. Assessing and boosting resilience of distribution system under extreme weather[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(2): 505-513, 681.
- [27] 郭琦, 卢远宏. 新型电力系统的建模仿真关键技术及展望[J]. 电力系统自动化, 2022, 46(10): 18-32.
- GUO Qi, LU Yuanhong. Key technologies and prospects of modeling and simulation of new power system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2022, 46(10): 18-32.
- [28] 曾飞, 杨雄, 苏伟, 等. 基于区块链与数据湖的电力数据存储与共享方法[J]. 电力工程技术, 2022, 41(3): 48-54.
- ZENG Fei, YANG Xiong, SU Wei, et al. Power data storage and sharing method based on blockchain and data lake[J]. Electric Power Engineering Technology, 2022, 41(3): 48-54.
- [29] 孙阳盛, 涂崎, 赵中华, 等. 基于5G及IEC61850的韧性配网故障信息智能传输技术研究[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(21): 108-117.

- SUN Yangsheng, TU Qi, ZHAO Zhonghua, et al. Intelligent transmission technology of fault information in a resilient distribution network based on 5G and IEC61850[J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(21): 108-117.
- [30] 苏华权, 周昉昉, 易仕敏, 等. 基于电力物联网的数据智能检测模型研究[J]. 电力信息与通信技术, 2022, 20(3): 34-39.
- SU Huaquan, ZHOU Fangfang, YI Shimin, et al. Research on intelligent data detection model based on power internet of things[J]. Electric Power Information and Communication Technology, 2022, 20(3): 34-39.
- [31] 王亚军, 杨立波, 马斌, 等. 虚拟同步机惯量及阻尼系数协调优化方法[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(19): 88-98.
- WANG Yajun, YANG Libo, MA Bin, et al. Coordination and optimization strategy of virtual inertia and damping coefficient of a virtual synchronous generator[J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(19): 88-98.
- [32] 刘席洋, 王增平, 郑博文, 等. LCC-HVDC 故障恢复型连续换相失败机理分析与抑制措施[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(10): 3163-3172.
- LIU Xiyang, WANG Zengping, ZHENG Bowen, et al. Mechanism analysis and mitigation measures for continuous commutation failure during the restoration of LCC-HVDC[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(10): 3163-3172.
- [33] SALAMA H S, MAGDY G, BAKEER A, et al. Adaptive coordination control strategy of renewable energy sources, hydrogen production unit, and fuel cell for frequency regulation of a hybrid distributed power system[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2022, 7(3): 472-489.
- [34] 吕哲, 王增平. 基于暂态电流波形特征的快速差动保护新原理[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(5): 1534-1545.
- LÜ Zhe, WANG Zengping. A transient current waveform feature based novel high-speed differential protection[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(5): 1534-1545.
- [35] 胡加伟, 王增平, 蓝益军, 等. 基于小波能量熵的超高压交流线路暂态保护研究[J]. 华北电力大学学报(自然科学版), 2019, 46(2): 10-18.
- HU Jiawei, WANG Zengping, LAN Yijun, et al. Wavelet energy entropy-based transient protection for EHV AC transmission line[J]. Journal of China Electric Power University (Natural Science Edition), 2019, 46(2): 10-18.
- [36] 王增平, 朱劭旋, 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 Shaoyuan, 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.
- [37] 王增平, 相禹维, 王彤. 台风暴雨灾害下的 110 kV 线路倒塔与断线事故评估方法[J]. 电力系统自动化, 2022, 46(3): 59-66.
- WANG Zengping, XIANG Yuwei, WANG Tong. Assessment method of tower falling and line disconnection accidents for 110 kV line in typhoon and torrential rain disaster[J]. Automation of Electric Power Systems, 2022, 46(3): 59-66.

收稿日期: 2022-10-20; 修回日期: 2023-02-09

作者简介:

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

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)