

# 新型电力系统下继电保护适应性与挑战分析

田园

北京唐浩电力工程技术研究有限公司

DOI:10.32629/etd.v6i12.19230

**[摘要]** 本文系统分析了新型电力系统在电源结构、电网形态、运行特性等方面的根本性变化,深入探讨了其对继电保护动作性能、原理适应性及整定配合带来的影响。重点剖析了新能源接入导致的故障电流弱化、方向性模糊、谐波畸变加剧、频率偏移等问题,以及交直流混联、柔性输电、微电网等新场景对保护选择性、速动性和可靠性的冲击。在此基础上,从原理创新、技术融合、体系重构三个维度,提出了面向新型电力系统的继电保护适应性提升路径,包括基于广域信息的自适应保护、人工智能辅助决策、多源数据融合保护架构等前瞻性方案。最后,对继电保护技术的未来发展方向进行了展望,旨在为构建安全、可靠、高效的新型电力系统提供理论支撑与实践参考。

**[关键词]** 新型电力系统; 继电保护; 适应性; 挑战; 电力电子化; 可再生能源

**中图分类号:** TM77 **文献标识码:** A

## Analysis of Adaptability and Challenges of Relay Protection in New Power System

Yuan Tian

Beijing Tanghao Electric Power Engineering Technology Research Co., Ltd.

**[Abstract]** This paper systematically analyzes the fundamental changes in the new power system in terms of power source structure, grid configuration, and operational characteristics, and deeply explores their impact on relay protection operation performance, principle adaptability, and setting coordination. It focuses on analyzing problems caused by renewable energy integration such as weakened fault current, directional ambiguity, intensified harmonic distortion, and frequency deviation, as well as the impact of new scenarios such as AC-DC hybrid systems, flexible transmission, and microgrids on protection selectivity, speed, and reliability. On this basis, from three dimensions of principle innovation, technology integration, and system reconstruction, this paper proposes adaptability enhancement paths for relay protection in new power systems, including adaptive protection based on wide-area information, artificial intelligence-assisted decision-making, and multi-source data fusion protection architecture. Finally, it provides an outlook on the future development direction of relay protection technology, aiming to provide theoretical support and practical reference for building a safe, reliable, and efficient new power system.

**[Key words]** new power system; relay protection; adaptability; challenges; power electronics; renewable energy

### 引言

继电保护作为电力系统的“免疫系统”,是保障电网安全稳定运行的第一道防线。其核心任务是在系统发生故障时,以最快速度、最高选择性切除故障元件,最大限度地减小故障对系统的影响。然而,传统继电保护技术是基于同步发电机提供强支撑、系统呈现强惯性和线性特性的物理模型发展起来的。新型电力系统的“双高”(高比例可再生能源、高比例电力电子设备)特性从根本上改变了电网的电磁暂态和机电暂态过程,使得传统保护原理在诸多场景下面临失效风险。因此,深入研究新型电力系统对继电保护带来的新挑战,并探索具有高度适应性的新一

代保护技术,已成为当前电力系统领域亟待解决的关键科学问题与工程难题。

### 1 新型电力系统的主要特征及其对继电保护的影响机理

#### 1.1 电源结构的根本性转变

新型电力系统中,风电、光伏等新能源通过电力电子变流器接入电网。这些变流器受控于内部控制策略,在故障期间的行为与同步机截然不同。(1)故障电流弱化:新能源变流器配置限流策略,故障电流被限制在额定电流的1.1~2倍,远低于同等容量同步机数倍甚至十倍以上短路电流。故障特征信号微弱,使依赖

电流幅值启动的传统过流保护、距离保护等灵敏度下降,甚至无法启动。(2) 电流方向与相位不确定: 同步机故障电流相位由系统阻抗角决定,有明确方向性;新能源变流器输出电流相位由控制环决定,电网电压跌落或畸变时,锁相环动态响应致输出电流相位波动,破坏“电流-电压”相位关系,造成方向误判<sup>[1]</sup>。(3) 频率支撑能力缺失: 同步机转动惯量大,可抑制系统频率快速变化;新能源无惯量,频率响应依赖虚拟同步机等策略,效果有限,系统惯量下降,频率变化率增大,对依赖频率信息的保护构成挑战。

### 1.2 电网形态与运行方式的复杂化

新型电力系统呈现复杂网络形态。(1) 交直流混联系统: 特高压直流、柔性直流等技术广泛应用,形成复杂电网。直流系统故障会引发交流侧暂态过程,干扰交流侧保护;且直流线路缺乏自然过零点,其保护依赖特殊原理,与交流保护配合协调难度大。(2) 柔性输电设备渗透: 静止同步补偿器等FACTS设备增强系统调控能力,但其快速动态调节特性会改变局部网络阻抗特性,使基于固定阻抗模型的距离保护测量阻抗偏移,失去选择性。(3) 有源配电网与微电网: 分布式电源大量接入,使配电网变为多电源、多方向有源网络,故障电流路径不唯一,传统电流保护选择性难保证;微电网模式切换时,要求保护具备自适应能力。

### 1.3 电磁暂态过程的非线性与宽频化

电力电子设备的开关动作引入了大量高频谐波和非特征谐波。系统故障时,电力电子设备的非线性控制回路与电网电磁暂态过程深度耦合,产生复杂的宽频振荡和暂态分量。(1) 谐波污染与波形畸变: 故障电流/电压波形严重畸变,含有丰富的间谐波和高次谐波。这不仅影响基于傅里叶变换的工频相量提取精度,也使得依赖纯正弦波假设的阻抗计算、功率方向判据等产生误差。(2) 宽频动态特性: 新型电力系统的动态响应覆盖从次同步到数百赫兹甚至更高频段。传统保护仅关注工频(50/60Hz)附近的电气量,可能忽略关键的宽频故障特征,导致保护性能下降。

## 2 继电保护面临的具体挑战

### 2.1 传统主保护性能劣化

(1) 纵联差动保护: 在长距离输电电路上,新能源送出线路的分布电容电流显著增大,且受电力电子设备控制影响,其暂态特性复杂。这会导致差动电流中包含较大的不平衡电流,降低保护的灵敏度和可靠性。(2) 距离保护: 这是应用最广泛的输电线路主保护之一。新能源的弱馈特性使得反向故障时可能出现“超越”现象(即保护范围延伸至下一线路),而正向故障时又可能出现“欠范围”现象(即保护范围缩短)。FACTS设备的接入会直接改变线路的等效阻抗,使距离保护的整定值失效。(3) 方向过流保护: 在有源配电网中,由于DG的存在,同一故障点可能从多个方向注入故障电流。若所有DG都按最大出力整定,则可能导致上级保护越级跳闸,丧失选择性。

### 2.2 后备保护协调困难

后备保护依赖于时间-电流或时间-距离的阶梯式配合。在新型电力系统中: 故障电流幅值小且不确定,使得基于电流定值的时限配合逻辑难以成立。系统运行方式灵活多变(如微电网模式切换、直流功率调制),使得保护之间的配合关系不再是固定的,而是时变的<sup>[2]</sup>。宽频振荡可能导致保护装置误测电流有效值,引发不必要的后备保护动作。

### 2.3 特殊场景下的保护难题

(1) 高阻接地故障(HIF)检测: 新能源场站内部及送出线路常发生高阻接地故障,其故障电流极小(可能仅几安培),淹没在正常负荷电流和背景噪声中。传统保护对此几乎无能为力。(2) 换相失败与连锁故障: 在含LCC-HVDC的系统中,交流侧故障易引发直流换相失败,进而导致多回直流同时闭锁,形成跨区域的连锁故障。现有的保护系统缺乏对这类复杂交互故障的快速感知和协同隔离能力。(3) 黑启动与恢复过程中的保护: 在系统全停后的黑启动过程中,电网处于极度脆弱状态,电压、频率波动剧烈。此时,如何避免保护在非故障扰动下误动,同时又能可靠切除真实故障,是一个巨大挑战。

表1 传统继电保护原理在新型电力系统中的适应性分析

保护类型	传统适用条件	新型电力系统下的主要问题	适应性评价
距离保护	系统阻抗恒定,故障电流强	新能源弱馈导致测量阻抗偏移; FACTS动态调节改变线路等效阻抗; 方向性模糊	低
纵联差动保护	两端电流同步,电容电流可忽略	长距离新能源送出线路分布电容电流大且受控; CT暂态特性不一致; 通信延迟影响同步精度	中
方向过流保护	单电源辐射网,故障电流单向	有源配电网多电源注入,故障电流路径复杂; DG出力波动导致整定难以整定	低
低频减载	系统惯量大,频率变化平缓	系统惯量下降, RoCoF增大; 频率响应非线性; 新能源脱网加剧频率跌落	中偏低
行波保护	对通信和采样率要求高	不依赖工频量,动作速度快; 对高阻故障、直流线路适应性强	高
差动保护(配网)	主要用于变电站母线和主变	微电网模式切换导致拓扑突变; 缺乏统一时钟同步; DG反向供电影响差流计算	中

## 3 提升继电保护适应性的技术路径

### 3.1 原理创新: 从本地量到广域信息

继电保护的原理创新,核心在于突破传统仅依赖本地电气量的局限,转向利用更丰富、更全局的信息进行决策。广域自适应保护正是这一思路的集中体现。它依托广域测量系统(WAMS)或高速光纤通信网络,能够实时获取系统中多个关键节点的同步相量(PMU)数据。通过对这些广域信息的在线处理与分析,保护系统可以实时辨识当前的电网拓扑、运行状态和新能源出力水平,并据此动态调整自身的定值、逻辑甚至保护原理。例如,在有源配电网中,区域保护中心可以根据实时的潮流分布和DG状态,自适应地调整各馈线过流保护的时限和定值,从而在任何运行方式下都能维持良好的选择性。此外,应充分挖掘故障全过程的暂态信息。故障初始瞬间产生的行波、暂态能量谱以及高频分量等,往往蕴含着比稳态工频量更为丰富和可靠的故障特征。行波保护因其超高速的动作能力(毫秒级)和对系统振荡、CT

饱和等因素的天然免疫性,特别适用于新能源送出线路和直流线路的主保护。未来的保护原理应走向模型驱动与数据驱动深度融合。精确的物理模型(如新能源的详细电磁暂态模型)可以为保护算法提供坚实的理论基础和可解释性,而数据驱动方法(如机器学习)则能从海量的历史和实时运行数据中自动挖掘出人眼难以察觉的复杂非线性故障模式,二者结合可形成兼具鲁棒性与智能性的混合保护新范式。

### 3.2 技术融合: 人工智能与多源感知

人工智能,特别是深度学习技术,在故障模式识别方面展现出巨大潜力。通过训练卷积神经网络(CNN)或长短期记忆网络(LSTM)等模型,可以直接对原始的故障录波数据进行端到端的学习,有效区分内部故障、外部故障、系统振荡、高阻接地等高度相似的复杂工况,其判别精度远超传统阈值比较方法。强化学习则可用于优化保护的策略,在保证系统安全的前提下,寻求动作速度、选择性和可靠性之间的最优平衡。与此同时,保护的感知维度也需从单一的电气量向多源异构数据融合拓展。将电压、电流等电气量与设备本体的非电气量(如变压器油温、GIS局放信号、风机振动数据)乃至环境信息(如气象数据、光照强度)进行综合分析,可以极大地提升故障诊断的准确性和全面性<sup>[3]</sup>。例如,在光伏电站,结合实时辐照度数据,就能有效甄别逆变器输出异常究竟是源于内部故障,还是仅仅因为云层遮挡导致的正常出力波动。数字孪生技术的引入,则为保护系统提供了“先验”能力。通过构建电网高保真的数字孪生体,可以在虚拟空间中对各种预想故障场景进行反复推演和保护策略验证,实现保护系统的“预测性维护”和“在线校核”,将潜在风险消灭在萌芽状态。

### 3.3 体系重构: 从集中式到分布式协同

一个理想的新型保护体系应是一个就地-区域-广域三级协同的有机整体。就地层由部署在一次设备附近的智能终端构成,负责执行超高速的故障切除任务,如基于行波原理的线路保护;区域层则汇聚区域内多个就地单元的信息,实现更复杂的区域差动、精准选线和故障隔离功能;广域层则站在系统全局的高度,负责协调不同区域保护的策略,执行切机、切负荷等安全稳定控制措施,并对整个保护系统的健康状态进行监视与管理。三

层之间通过高速、可靠、低延时的通信网络紧密连接,形成一个信息共享、功能互补的协同防御体系。在此基础上,“软件定义保护”的理念应运而生。它借鉴了软件定义网络(SDN)的思想,将保护的硬件平台与应用逻辑彻底解耦。保护功能不再固化在专用芯片中,而是以软件APP的形式部署在通用的高性能计算平台上。这使得保护功能可以根据电网的实际需求,像手机应用一样被灵活地加载、更新、组合甚至定制开发,极大地提升了保护系统的灵活性、可扩展性和生命周期价值<sup>[4]</sup>。当然,这一切的实现都离不开标准化与互操作性的强力支撑。必须大力推动IEC61850等国际标准在保护领域的深度应用,确保来自不同厂商、采用不同技术路线的保护装置能够无缝集成与协同工作,最终构建一个开放、包容、协同的继电保护新生态。

## 4 结语

新型电力系统快速发展,给继电保护技术带来系统性、深层次挑战。传统基于同步机特性和工频电气量的保护原理,难以满足“双高”电力系统安全需求。新能源接入、电网形态演变及电磁暂态宽频化,影响继电保护动作性能,使传统主/后备保护在灵敏度、选择性、可靠性等方面陷入困境。为应对挑战,未来继电保护技术发展有三大方向:深化原理创新,利用广域信息与故障全过程特征;加速技术融合,将人工智能等前沿技术嵌入保护逻辑;推动体系重构,构建新型保护架构。展望未来,量子传感等颠覆性技术成熟后,继电保护有望实现从“被动响应”到“主动预测”、从“元件保护”到“系统韧性”的跨越,构建自感知、自适应、自愈合的新一代体系,这是保障新型电力系统运行和实现能源互联网愿景的关键。

### [参考文献]

- [1] 吴天一. 新型电力系统中的继电保护策略分析[J]. 电子技术, 2024, 53(11): 170-171.
- [2] 张嘉业. 新型电力系统下继电保护技术的应用与优化策略[J]. 电工技术, 2025, (17): 188-190+193.
- [3] 王闪闪, 张灿灿, 王见. 基于新型电力系统的智能变电站继电保护技术探析[J]. 电力设备管理, 2025, (12): 2-4.
- [4] 刘庚源. 新型电力系统继电保护中自动化技术的应用[J]. 电工技术, 2024, (S2): 660-661+664.