

电力系统继电保护故障判断新方法与发展态势

李宏博

(巴斯夫一体化基地(广东)有限公司, 广东 湛江 524076)

摘要 随着新能源大规模接入电网, 电力电子设备大量应用于电力系统中, 电力系统负荷特征复杂化, 电力系统继电保护也遭遇了前所未有的挑战。电力系统发生故障时的特性更加难以捕捉、不易识别。电力系统的运行状态更加灵活多样, 对传统电力系统继电保护提出了更高的要求。本文从电力系统继电保护故障判断新方法和研究态势出发, 对电力系统传统继电保护存在的问题进行了分析, 深入介绍了人工智能相关技术, 对电力系统故障的诊断、基于广域测量系统的继电保护技术、数字化变电站技术、暂态量保护技术进行了探讨, 探究了应对高比例可再生能源并网保护难题的新思路, 以期为相关人员提供借鉴。

关键词 继电保护; 人工智能; 广域保护; 数字化变电站; 行波保护

中图分类号: TM77

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2025.28.011

0 引言

电力系统是现代社会极其重要的基础设施, 它的安全、稳定、可靠运行是国民经济发展和人民生活秩序的重要保障。继电保护是电力系统的第一道防线, 其主要任务是快速、准确地检测出故障元件, 将其从电网中切除, 最大限度地减少故障损失, 防止事故扩大。数百年来, 继电保护理论和技术经历了从机电式、整流管式、晶体管式到现在的微机化的发展历程, 其性能发生了质的飞跃。但是, 随着全球能源结构转型和“双碳”目标的推进, 以风、光为代表的可再生能源发电占比持续上升, 电力电子变流器(Inverter-Based Resources, IBRs)被广泛应用于源、网、荷各个环节, 形成了形态日趋复杂、特性发生深刻变化的新型电力系统。这种系统表现出“高比例可再生能源、高比例电力电子设备”的“双高”特点, 给依靠传统工频稳态量的继电保护理论带来了颠覆性的冲击, 主要表现在: 新能源发电所产生的故障电流幅值小、相位特性不可预知, 致使传统过流保护和距离保护灵敏性变差甚至拒动; 电力电子设备的迅速控制行为产生了复杂的暂态过程, 使得故障信号中的谐波和非工频分量变得非常繁杂; 系统运行方式灵活多变、交直流混联电网发展, 使故障传递途径变得愈加复杂, 对保护的选择性和配合提出了很大的难题, 在这种情况下, 探寻和探究适合新型电力系统特点的继电保护故障判定的新方法, 掌握其未来发展的趋势, 成了电力行业亟待

解决的重要课题, 有着极为重大的理论意义和工程应用价值。

1 人工智能技术驱动的故障诊断方法

1.1 深度学习在故障特征提取与识别中的应用研究

传统电力系统故障诊断方法在很长一段时间内是继电保护系统的核心, 这些方法非常依赖领域专家的经验 and 事先建立起来的较为简单的数学物理模型。它们的基本过程是, 先由技术人员按照对故障机理的理解, 人工设计并选取一组故障特征提取算法, 可能是基于傅里叶变换, 小波分析或者某种数学形态学的指标, 再用这些人工挑选出的特征来训练分类器或者设置阈值, 从而把系统的正常运行状态和故障状态区分开来。但是, 在新能源大规模接入、电力电子设备普遍应用以后, 新型电力系统的结构和运行方式变得越来越复杂, 其故障暂态过程表现出很强的非线性与不确定性, 这就造成故障特征既种类繁多又相互关联, 显得十分隐蔽, 在这种情况下, 人工设计出来的有限特征集很难涵盖所有的运行工况和故障类型, 从而让传统方法的适应性和准确性遭遇了前所未有的考验。

深度学习技术的兴起为此带来了革命性的突破, 它能够绕过繁杂的人工特征工程, 直接从原始数据到达诊断结果的“端到端”智能分析, 以卷积神经网络(CNN)为代表的一系列模型, 凭借自身对局部特征的敏锐感知能力, 呈现出独特优势, 借助卷积层和池化

层的层层递进, CNN 可以自动从原始的电压、电流采样序列中挖掘出最具有区分度的深层次特征, 一种高效的应用途径就是把一维的时序信号, 通过小波变换或者短时傅里叶变换之类的手段, 转变成含有时频信息的二维图像, 之后再依靠 CNN 在图像识别方面强大的识别能力, 精确地辨别出故障的种类以及发生的区段。值得一提的是, CNN 本身就具备平移不变性, 这就使得其对于故障出现的初始相角并不敏感, 从而极大地增强了诊断的鲁棒性, 而 RNN 以及它的变种 LSTM, 因为自身独特的循环结构以及记忆单元, 所以它们天生就适合处理时序数据, 可以很好地抓住故障前后电气量之间的时延关系以及动态变化趋势, 对于那些识别过程缓慢且特征较为微弱的高阻接地故障, 或者想要区分系统振荡与对称短路故障之类的难题来说, 有着非常高的应用价值, 这些深度学习模型既提升了故障诊断的准确率与速度, 又推动了电网保护朝着更加智能化、自适应化方向发展。

1.2 知识图谱驱动的专家系统智能化决策

虽然深度学习在提取特征方面有优势, 但其“黑箱”特性在某种程度上制约了它在需要高度可靠性和可解释性的继电保护领域的应用。为了应对这种情况, 研究人员开始尝试把数据驱动的深度学习模型同知识驱动的专家系统、知识图谱结合起来, 专家系统会把继电保护领域的专家所掌握的知识、经验和规则形式化, 从而建立起推理机制, 在发生故障的时候模仿专家的思考过程来执行逻辑判定和决策, 知识图谱可以将电力系统里设备台账、拓扑结构、保护定值、历史故障信息、运行规程等零散的知识进行关联, 变成一个巨大的知识网络, 发生故障时可以马上从知识图谱里面找寻相关消息。例如: 某条线路曾经出现过的故障类型、目前的天气状况、故障前后元件的保护动作情形等等, 把深度学习模型辨认出来的初步故障特征同专家系统规则库以及知识图谱给予的背景信息加以融合推理, 这样不但能极大地提高故障判定的准确度, 而且给最后的结论赋予了清楚的逻辑链条和解说根据, 弥补了单纯依靠深度学习模型难以解释的短处, 使得最终的故障判定结论既有数据支持, 又契合物理规律和运行经验, 这是保护智能化决策的关键^[1]。

2 面向系统级防护的广域信息融合技术

2.1 广域后备保护基于同步相量技术

传统的输电网后备保护采用阶梯时限配合的三段式保护, 具有动作时间较长、整定配合复杂、可能会

导致更大范围停电等缺点。但应用 WAMS 提供的全局同步相量的数据可以创建全新的广域后备保护方法, 这种方法主要是利用系统内不同节点间的电压相角差值, 依据流过这些节点的电流是流入还是流出, 以此准确判断出故障发生的区域, 在此基础上可以构建系统级的差动保护方法, 将一个区域电网甚至是整个同步电网作为一个大的保护单元, 计算流经这个地区所有的边界线路上电流相量和以此判断是否发生区内故障^[2]。该方法摆脱了传统后备保护依靠逐级延时配合的束缚, 在检测到故障之后能够迅速且有选择性地切断故障元件, 极大地缩减了后备保护的动作时间, 而且, 通过持续监测全网的电压相角分布情况, 可以清楚地找出系统功角失稳的“电气中心”, 进而对振荡解列作出更为优良的选择, 防止无谓的解列行为, 最大限度地维持主网架构的完整性, 避免电力系统崩溃的危险, 这种依托广域信息的后备保护方案, 是应对将来电网结构日益繁杂、运行方式不断改变这一趋势的必然走向。

2.2 广域与就地信息的协同保护策略

广域保护并不是要完全替代就地保护, 而是和就地保护形成优势互补、互相配合的立体保护结构。广域信息有全局视野, 但是通信链路长, 有延迟和丢失风险; 就地信息实时性强、可靠性高, 不过没有系统全局状态的感知能力, 所以把两者有效融合起来是改进保护性能的关键。一种典型的运用形式就是用广域信息去自动调整就地保护, 控制中心凭借 WAMS 搜集到的实时运行方式数据, 执行在线计算和评价电网的稳定边界和故障潮流分布, 然后通过通信网络把改良过的保护定值或者控制策略发给各个变电站的保护装置。这样保护定值就不是一成不变的了, 它会随着系统运行状态的变化而变化, 始终维持着最佳的灵敏性和选择性, 从而解决了传统定值在各种运行方式下难以两全的矛盾。另一种模式就是用广域信息对就地保护的動作行为进行校核和闭锁。比如某条线路上的距离保护判断要出口时, 就可以用相邻 PMU 上送的同步相量数据来进行二次判别, 如果全网的状态显示是系统的振荡而不是真正的故障, 那么就可以闭锁这条保护的出口, 避免保护在系统振荡时发生误动^[3]。

3 数字化变电站暂态量保护技术驱动研究

数字化变电站属于智能电网创建的关键部分, 它的关键特点就是采用符合 IEC61850 标准的通信网络和体系结构, 做到信息采集的数字化、传输的网络化, 这种变革对继电保护的技术形态有着显著的影响, 特

别为借助故障暂态信息的保护原理提供了前所未有的机会。ET 和 MU 的运用,使得高采样率、高精度的暂态电气信号可以被及时获取,过程层光纤网络的低延迟,大带宽特性保证了大量暂态信息的可靠传输,从而促使像行波保护这样的新一代暂态量保护技术的产生。

3.1 行波信息在故障定位与保护中的应用研究

电力系统发生短路故障的时候,故障点会出现一个突变的电压和电流,这个突变会以接近光速的速度沿线路向两侧传播,这就形成了故障行波,行波蕴含着大量的故障信息,比如故障出现的确切时间,故障距离还有故障类型等。按照行波的保护原理,我们可以在线路的两端装设高频采集装置,准确地记录下故障行波抵达两端的时刻,利用双端行波抵达的时间差,或者利用初始行波和对端反射行波的时间差,再加上行波的传播速度,就可以算出故障点到线路端点的精确距离,这种定位的精准度能够达到百米级别,比依靠工频量的距离保护精确得多^[4]。这种精确的定位能力给故障快速隔离和故障定位带来了很大方便,而且,行波保护的動作依靠故障发生之后第一个或者前几个波头的信息,動作速度非常快,理论上可以在毫秒级别完成故障判定,而且不受系统振荡、潮流方向、高阻接地等影响,特别适合于长距离、高电压等级的输电线路和对跳闸时间要求极其严格的直流输电系统。随着高频传感器技术、数据处理芯片性能不断提升,行波保护正在由单纯测距功能向测距、保护双重功能迈进,这是超高速保护领域的关键方向。

3.2 高频暂态信息的综合利用

除了行波信息,故障发生后高频暂态过程中还存在其他信息,比如故障电流暂态过程中的非工频分量,其幅值、频率和衰减特性与故障类型、过渡电阻及系统参数相关联,通过细致分析这些高频分量,可形成新的保护原理,小波变换等多分辨率分析工具可用于对电流信号实施时频分解,提取特定频带内的能量或者模极大值作为故障识别的特征量,这种方法对高阻接地故障等工频量变化不明显的故障类型较为敏感。在配电网范畴内,由于电缆线路所占比例较高且拓扑结构较复杂,因此单相接地故障后暂态零模电流特征成为研究重点。故障初始阶段暂态零模电流的极性、幅值以及持续时间能够被分析出来之后,就能够把容性电流同故障电流区分开来,进而完成快速又可靠的选择接地。数字化变电站技术的发展,使得对那些原先通过滤波器被清除掉的暂态高频信息的全部捕获和

深层剖析变成可能。基于此,继电保护打开了一片新的信息天地,使得继电保护的原理从依托稳态工频量朝全面采用暂态及稳态的全部频带信息实行深度变革的方向前进^[5]。

4 结束语

电力系统继电保护正处在变革和快速发展时期,“双高”新型电力系统给电力系统带来了重大考验,同时也推动着新技术不断涌现,故障判断的新办法层出不穷,发展态势清楚地朝着智能化、广域化、数字化、协同化方向前进。人工智能技术,尤其是深度学习正在由理论研究步入工程实际应用当中,它的非线性映射和自动学习特征,为解决复杂故障的精确识别问题提供了革命性手段。依靠 WAMS 的广域保护技术突破了传统保护只能依赖本地信息的局限,从而使得从系统整体角度来改进保护效果成为可能,这是确保大电网安全稳定的关键。数字化变电站则实现了继电保护物理层面的巨大飞跃,如行波保护这种依靠暂态量的保护技术,把保护的速度和精度推进到了一个新的层次。未来,仅靠某一项技术已不能满足系统的需求,不同技术深度融合才是大势所趋,如把广域信息当作深度学习模型的输入,营造出知悉全面形势的智能守护系统;在数字化变电站的架构之下,需交融行波信息、高频暂态量、安稳工频量等多种信息资源,形成多信息源协同决议的立体保护体系。这样一条技术发展的道路很远,必须依赖产学研各界持续的探寻和配合,方能搭建起更加牢靠、高效且智能的新型继电保护体系。

参考文献:

- [1] 葛耀中,董新洲,刘皓明,等.新型电力系统继电保护面临的挑战及发展方向[J].电力系统自动化,2022,46(14):1-15.
- [2] 毕天姝,王宾,杨奇逊.人工智能在电力系统继电保护中的应用与展望[J].电网技术,2021,45(03):837-847.
- [3] 索南加乐,贺家李,董新洲.电力系统广域保护与控制技术研究综述[J].中国电机工程学报,2019,39(01):64-78.
- [4] 李宏,袁宇,兰凯,等.数字化变电站技术发展对继电保护的影响及对策[J].电力系统保护与控制,2020,48(17):1-10.
- [5] 何奔,尹项根,陈曦,等.基于行波测距的输电线路故障精确定位技术研究与应用综述[J].高电压技术,2023,49(05):1761-1776.