

[新能源]

高比例新能源电力系统对继电保护的影响及对策

文/杨君 樊云龙 张帅东
内蒙古电力(集团)有限责任公司包头供电分公司

新能源装机量持续提升,电网复杂故障增加,给电力系统继电保护提出了新挑战。从暂态特性改变、电网脆弱性增加、运行方式时变三个方面阐述了高比例新能源接入对电力系统继电保护的影响,进而在利用大数据技术挖掘故障特征量、构建以特征量指标为故障判据的继电保护新技术,构建以变电站间数据交互为关键技术的站域保护等方面阐述了解决思路。

“西电东送”工程、特高压交直流输电工程等输电通道陆续投产,国家能源局提出实施大规模高比例新能源外送攻坚行动。我国新能源装机容量不断提升,如图1所示。但新能源电源大多位于沙漠、戈壁和荒漠等偏远地区,受地区经济及技术水平影响,送电端的电网结构普遍脆弱,高比例新能源接入将改变地区电网运行方式,给电网安全稳定运行带来挑战。本文旨在分析高比例新能源接入对电力系统继电保护的影响,并提出相应解决思路,以期为相关研究提供有益参考。

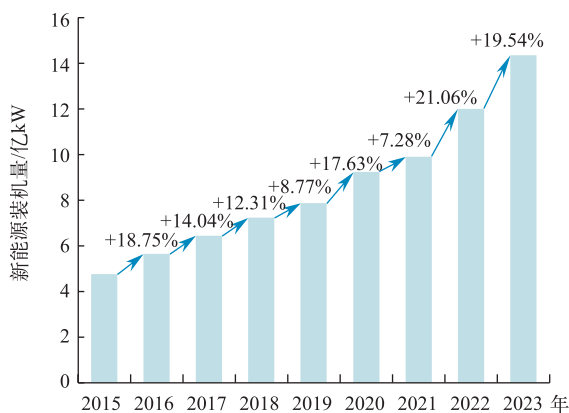


图1 全国新能源装机容量增长趋势

电力系统继电保护的基本任务

故障状态指由于设备故障或误操作,导致电网无法正常运行。电力系统的运行状态由继电保护装置实时监测告警,必要时经延时切除故障设备^[1]。继电保护是我国电力系统第一道防线,对其要求是:选择、快速、可靠、灵敏,在准确识别故障、快速可靠隔离故障、保护电网安全运行方面发挥重要作用。随着故障录波技术发展,继电保护为电网运行调度人员提供故障前、中、后的电网状态数据,支撑着电网故障分析与调度决策。

以线路保护为例。投运前进行继电保护整定计算,根据线路参数模拟各种故障,计算继电保护装置应自动跳开断路器的电流、电压、阻抗等特征量的定值及时间。现场人员将定值输入保护装置并进行模拟校验。线路投运后,保护装置实时监测反映系统状态的电气特征量,与定值比较,当某测量值达到保护定值时,继电保护装置依据自身动作逻辑切除故障设备。

高比例新能源电力系统的基本特征

1. 电力电子化改变系统暂态特性

以风力和光伏发电为主的新能源发电系统由许

多电力电子设备组成。随着装机比例提高,大量电力电子设备接入电网,整个系统呈现多尺度时间特性。相比传统设备,电力电子设备响应速度快,系统发生故障后,新能源电力系统的故障演化速度提高,新能源电源脱网、局部电网解列等事故的演化时间变短,电网发生连锁故障的概率随之提高,对继电保护提出更高要求。

暂态特性描述电网受扰动后安全稳定运行的能力。传统电力系统暂态特性、系统稳定运行边界、失稳调控等分析方法已经成熟,并在电力行业广泛使用。但这套理论难以支撑高比例新能源电力系统暂态特性的认识,对电力电子化系统暂态特性理论、暂态过程、模型分析方法等问题研究还不够深入^[2]。

2. 电力电子化增加系统脆弱性

清洁能源外送,特高压直流输电技术得到大力发展,我国已建成世界上规模最大的交直流混联电网,更多电力电子设备入网。交流系统的短路故障会导致数千公里外的直流系统出现继发性故障,此时系统故障为交直流系统的叠加故障,增大了事故控制、分析难度。

电力电子设备易于控制、响应速度快,但其过载能力差、抗扰动能力差及对系统电压频率支撑能力不足等特征导致整个系统不确定性增加。传统电力系统的不确定性多由事故导致,且多数可预见可控制,而新能源电力系统的不确定性则体现在系统运行的全过程,使系统稳定性下降^[2]。电力电子化的电力系统整体呈现脆弱性。

3. 新能源的波动性引起电网运行方式实时变化

综合考虑历史运行记录、未来负荷增长预测、能源供应情况等因素,电力调度部门会编制电力年、月、日调度计划,各发电、变电单位依据调度计划开展电力生产。

新能源发电量受风速、光照强度等自然因素限制较大,致使接入大电网的新能源电站出力具有波动性和间歇性。以光伏发电为例,太阳光照强度足时,光伏满功率输出;当太阳光被短暂遮挡时,发电效率降低到50%以下;太阳落山后,光伏板接收不到光源,此时系统无输出。此外,新能源电源频繁并网、脱网等现象对主网电压冲击较大,电网运行方式实时改变。

高比例新能源接入对继电保护的影响

1. 暂态过程不明确影响继电保护正确动作

继电保护正确动作的前提是准确监测反映故障的电气特征量变化,当某一特征量达到继电保护动作条件时,快速准确切除故障点视为正确动作,拒动、误动都为不正确动作。

继电保护常用电气特征量为电压、电流、阻抗等,它们直接或间接反映电力系统常见的短路、断线等故障。随着新能源接入比例不断提高,故障前后的暂态过程逐渐由电力电子设备主导。传统电力系统暂态分析方法以叠加原理为基础,无法准确反映电力电子设备非线性的响应过程^[4]。工程实际中将电力电子设备控制参数“黑箱化”,通过预先设定的控制策略改变输出电流等特性,新能源电网故障的暂态特征不能被完全解析。在电网形态日益复杂的趋势下,无法精确分析故障特征将影响电力系统安全稳定运行。

2. 系统谐波含量增加影响继电保护正确动作

电力电子设备对电气量的波动较为灵敏,因此,当交流系统发生故障时,换流站的电力电子设备会迅速感受到故障量,导致直流系统出现继发性故障,通常直流故障的暂态过程发生在交流系统的继电保护装置动作之前。

直流系统发生故障时,会通过定关断角控制、电流控制等措施保护电力电子设备,导致系统内非特征谐波含量增加。这些谐波叠加在交流系统保护装置测量的电流、电压等特征量上,导致计算误差增大,影响纵联差动保护、距离保护等基于工频突变量的保护动作。

3. 运行方式实时改变影响继电保护整定计算

保护装置投运后,其定值一般不允许实时修改,因此在整定计算阶段需考虑可能发生的各种故障,确保定值投入后,保护装置对保护范围内故障有足够灵敏性。常规保护整定计算时考虑范围仅为局部电网,取得计算所需的电压、电流等电气量参数,同时考虑小范围内电网运行方式改变导致的阻抗矩阵变化。

高比例新能源接入后,电网运行方式实时变化,保护整定计算需综合考虑能够对保护安装处电气量产生影响的所有新能源电源。在工程实际中,距离故障点较远的新能源电站对故障点的影响忽略

不计，距离较近的则不能忽略^[5]。

高比例新能源电网的继电保护应对策略

1. 应用大数据技术充分挖掘故障特征

神经网络、数据挖掘等新技术已在各行各业得到广泛应用。搭建基于人工神经网络的高比例新能源电力系统仿真模型，使用电网历史运行大数据训练，综合考虑模型与实际情况的偏差，修正模型参数，使其逐渐逼近实际系统。训练好的神经网络模拟电力系统，对交直流混联电网常见故障模拟和预测，输出各关键节点的特征电气量数据。将得到的数据用聚类分析等数据挖掘技术进行故障量特征提取，对得到的故障特征量进行定义，作为新能源电力系统故障特征判据。

在新能源电力系统中应用此模型，能充分利用电力大数据，以高效的方式挖掘数据背后的含义，对揭示高比例新能源电力系统的故障特征起到关键作用，进而服务继电保护。

2. 构建基于故障特征量的电力系统继电保护新原理

传统继电保护依赖电压、电流等直接测量的电气特征量，新能源电力系统中电力电子设备带来的谐波问题不容忽视。利用新能源电力系统故障特征判据，构建新一代继电保护原理，如图2所示。由于继电保护动作有快速性要求，该原理还需利用云计算等在线计算方式，在允许的误差时间内持续计算并将数据提供至保护装置。

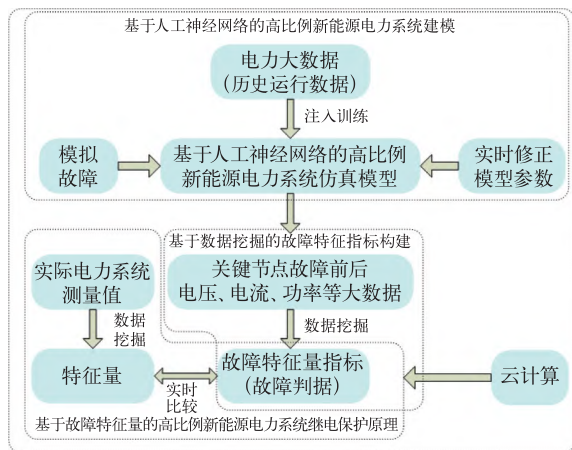


图2 基于故障特征量的高比例新能源电力系统继电保护技术路线

该原理不使用测量的原始数据，而使用挖掘后的特征量，不受电力电子设备的非线性特征影响，能准确反映故障类型和特征，提高继电保护的灵敏

性、选择性和可靠性。但该原理受在线计算速度和网络情况等限制，在保证继电保护快速性方面还需进一步研究。

3. 构建适应新能源电力系统的站域保护

传统继电保护以线路、母线、变压器等输变电设备作为保护对象，这些设备均通过电力网络与新能源电源互联，继电保护装置测得的电气量均会受电网侧其他谐波干扰。站域保护则以变电站、新能源电站等电力网络节点为保护对象，将全站所有电气量、开关量等关键逻辑信息采集至站域保护主机内，由主机执行逻辑判断并向故障设备发出跳闸命令^[6]。各站域主机间实现数据交换，如图3所示。

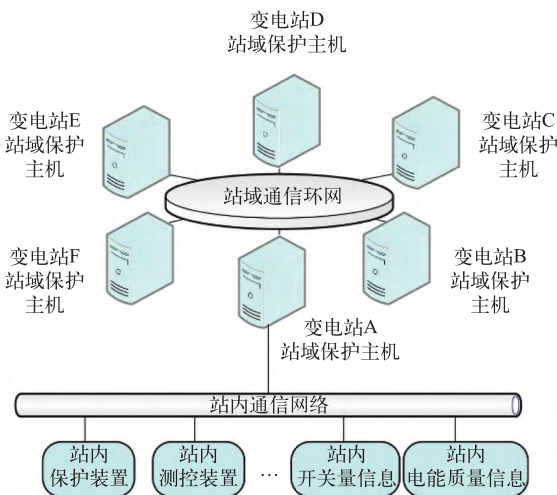


图3 适应新能源电力系统的站域保护技术路线

站域主机间的数据交换，可以实时监测电网运行方式，执行不同保护策略，该方案将新能源出力间歇性的影响转化为可时变的保护策略，降低继电保护整定计算难度，提升保护动作灵敏性，但实现大量数据实时交换还需要坚强的电力通信网络作为支撑。

结束语

构建高比例新能源电力系统是实现碳中和的重要举措^[7]。我国北部、西部等资源优渥的能源基地相继落成，大量清洁能源接入电网，形成了多种能源互补的能源网络，同时也为电力系统的保护控制带来新课题。本文对新能源电力系统的基本特征及其对继电保护的影响进行了研究，并从提高继电保护性能的角度，创新地提出三个解决思路。

1) 在故障分析方面，新能源接入后，系统故

障特征量从形式上发生变化，降低了传统继电保护的灵敏性。应用数据技术挖掘电力大数据背后的特征量能有效提升保护装置的故障识别率和正确动作次数。

2) 在保护原理方面。新能源电力接入使常规保护的计算误差增大，以挖掘后的特征量为保护动作依据，将减少因计算误差导致的继电保护不正确动作次数。

3) 在保护对象方面。以输变电设备为保护对象的传统继电保护受网络结构影响，新能源出力的间歇性导致电网运行方式实时变化。将保护对象提升至整个变电站，通过站域间数据实时交换，减小电网结构变化对保护装置动作的影响，提升继电保护可靠性。

未来，新能源装机容量持续提升，电力系统复杂故障场景不断增加，继电保护与控制技术将持续为电网安全稳定运行保驾护航。**EA**

(收稿日期：2025-01-05)

参考文献

[1] 张保会，尹项根．电力系统继电保护[M]．北

京：中国电力出版社，2010．

[2] 胡家兵，朱建行，郭泽仁，等．电力电子化电力系统多时间尺度时变动态小干扰稳定问题[J]．中国电机工程学报，2024，44(18)：7349-7360．

[3] 董新洲，汤涌，卜广全，等．大型交直流混联电网安全运行面临的问题与挑战[J]．中国电机工程学报，2019，39(11)：3107-3119．

[4] 郑玉平，吕鹏飞，李斌，等．新型电力系统继电保护面临的问题与解决思路[J]．电力系统自动化，2023，47(22)：3-15．

[5] 郑心怡，张健康，李怀强，等．适用于含新能源交流电网继电保护整定计算的故障计算方法研究[J]．电网技术，2024，48(9)：3852-3862．

[6] 吴振杰，王源涛，方愉冬，等．新型电力系统保护控制技术架构研究[J]．浙江电力，2024，43(1)：1-11．

[7] 鞠平，姜婷玉，黄桦．浅论新型电力系统的“三自”性质[J]．中国电机工程学报，2023，43(7)：2598-2607．

