

继电保护在可再生能源接入中的挑战与解决方案

崔国永

山东龙源新能源有限公司 山东济南 250000

摘要: 随着可再生能源(如风能、太阳能等)的大规模接入电网,传统电力系统的运行和保护方式面临诸多挑战。由于可再生能源电源的波动性、间歇性及并网方式的多样化,传统的继电保护系统难以适应其特性,导致故障识别、定位、隔离等过程中的不确定性和误动现象增多。本论文探讨了可再生能源接入电网后对继电保护带来的主要挑战,分析了故障电流幅值变化、保护定值整定复杂性、同步与通信问题等方面的技术难题,并提出了一些有效的解决方案,包括自适应保护技术、广域测量系统、人工智能优化及微电网协调保护等技术手段。最后,本文展望了未来继电保护技术的发展趋势,强调了智能化、多能源协同和标准化体系的重要性,期望为相关领域的研究和工程应用提供参考与指导。

关键词: 继电保护; 可再生能源; 电力系统; 故障识别; 智能化保护

引言

随着全球能源结构的转型和可再生能源的快速发展,风电、光伏等可再生能源逐渐成为电力系统的重要组成部分。相比传统的火电、水电等集中式能源系统,可再生能源具有波动性、间歇性等特征,且多为分布式接入,这给电力系统的继电保护带来了前所未有的挑战。传统的继电保护系统主要基于集中式电源,依赖于稳定的电流幅值和简化的系统模型进行故障判定。然而,随着可再生能源的大规模接入,故障特性变得更加复杂,电力系统的动态行为也随之发生变化。如何在这一新环境中保障电力系统的安全运行,成为亟待解决的问题。本文旨在分析可再生能源接入对继电保护系统的影响,探索当前面临的技术挑战,并提出相应的解决方案,为可再生能源接入后的电力系统提供更可靠的保护支持。

一、可再生能源接入对继电保护的影响

(一) 可再生能源的接入方式与系统结构变化

随着可再生能源的大规模接入,电力系统的结构发生了显著变化。传统电力系统主要依赖集中式发电厂,电力通过长距离输电线路传输至负荷中心。而可再生能源,尤其是风电和光伏,大多数为分布式发电,直接接入低压或中压配电网,导致电网的分布式特征更加明显。这种变化不仅提高了系统的复杂性,也使得传统的电力系统调度和继电保护方法面临新的挑战。尤其是在多种

能源协同运行的情况下,系统的运行方式更加动态,负荷波动、并网电压波动等因素可能引发复杂的电气故障,继电保护系统必须调整以适应这种变化。

(二) 分布式电源对继电保护配置的影响

分布式可再生能源接入电网后,常常通过逆变器将直流电转化为交流电并并网,这种逆变器并网方式使得电流变化更加复杂,无法像传统发电机那样提供稳定的短路电流,这给故障检测和定位带来了困难。传统的继电保护依赖于故障电流的大小和变化来判断是否发生故障,而分布式电源的接入往往使得系统的故障电流变得不稳定或不显著,尤其是在低负荷或高渗透率的情况下,故障电流可能不足以触发保护装置的动作。此外,分布式发电与传统电源的并网方式不同,保护策略的协调性和互操作性问题也随之产生^[1]。

(三) 新型电源对故障特性和保护判据的影响

可再生能源的故障特性与传统电源有很大差异,特别是风电、光伏等可再生能源发电单位的短路容量较低,且其输出电流的波动性较大,难以提供稳定的故障电流支撑。风电系统中,风速的变化会导致发电功率波动,从而使得并网电流的特性变化。此外,太阳能光伏发电由于受到辐射强度变化的影响,其发电功率具有较强的波动性。这些变化使得传统的继电保护装置很难准确判断故障的发生,容易出现误动作或拒动的情况。因此,亟需研究新的保护判据,以适应可再生能源接入后的电网环境。

二、继电保护在可再生能源接入中的主要挑战

(一) 故障电流幅值变化带来的识别困难

在可再生能源接入的电网中，故障电流的幅值和特性与传统电力系统显著不同。由于可再生能源的发电方式以逆变器为主，这些电源通常不提供大幅度的短路电流，因此在发生故障时，电流幅值往往较小，难以被传统的保护装置所识别。尤其在高渗透率的光伏或风电接入情形下，电网内的电流波动较大，传统基于短路电流幅度的保护方式无法适应这种新的电网环境^[2]。这就需要开发新的故障检测方法，以提高低故障电流条件下的保护可靠性。

(二) 继电保护定值整定的复杂性提升

可再生能源接入后，电网的运行方式更加多变，负荷和发电的波动性加大，使得传统的继电保护定值整定工作变得复杂。传统系统中，保护定值的选择较为简单，通常依据系统的最大负荷和最小故障电流进行设定。然而，在多种可再生能源接入后，电流幅值 and 变化频率的不确定性增加，导致传统定值整定方法难以应对电流波动和不对称性。为了确保继电保护在动态系统中正常工作，需要根据实时电网运行数据进行动态调整，甚至采用自适应保护策略来应对负荷波动和发电波动。

(三) 同步与通信问题对保护动作的影响

随着可再生能源大规模接入，电网内多种电源的运行更加分散，造成系统通信和同步的复杂性增加。继电保护装置往往依赖于电网内的同步信息来判断各个保护区域的状态。可再生能源的接入可能导致电网频率和电压波动，这种波动使得系统的同步性差，继电保护设备在这种环境下可能无法精确获取必要的系统数据，从而影响保护动作的准确性。此外，通信延时和数据丢失也可能影响保护设备间的信息传递，进而导致保护动作的延迟或误动作。

(四) 并网不稳定性引发的保护误动或拒动

可再生能源的波动性和间歇性可能导致电网频繁发生并网不稳定现象，例如电压暂降、频率波动等，这些变化会影响继电保护的正常动作。在一些情况下，当电网发生暂时性波动时，传统继电保护系统可能误判为故障，导致误动作。而在电网出现真实故障时，由于电流和电压的波动较大，传统保护装置可能未能及时响应，导致拒动现象。因此，如何在保障电网安全的同时，避免因并网不稳定性引发的误动作或拒动，是可再生能源接入电网后继电保护面临的重要挑战之一。

三、面向挑战的技术解决方案

(一) 自适应保护技术的发展与应用

自适应保护技术是应对可再生能源接入后继电保护挑战的重要手段之一。与传统继电保护方法不同，自适应保护可以根据电网运行的实时数据自动调整保护定值和参数，实时响应电网状态的变化。随着可再生能源的动态特性，电网负荷和发电功率的不确定性增加，传统的固定定值保护方法无法满足需求，而自适应保护系统通过在线监测和自我调整，能够在电网不同运行条件下确保保护设备的精确动作。这种技术的应用不仅能提高故障检测的准确性，还能减少误动作和拒动的发生，保障系统的稳定性和可靠性。

(二) 基于广域测量系统(WAMS)的保护策略

广域测量系统(WAMS)利用同步相量测量单元(PMU)提供的实时同步数据，为电力系统的监控和保护提供了新的思路。通过WAMS，继电保护系统可以实时获取电网的相位、频率、电压等数据，尤其是在大规模可再生能源接入的情况下，WAMS能够有效监控电网各个节点的运行状态，帮助保护设备做出更为精准判断。通过这种实时的广域数据共享，继电保护能够更好地应对电网的动态波动、分布式电源接入等复杂环境，提升了故障诊断和处理的时效性，避免了传统保护方法中可能出现的误动作和拒动^[3]。

(三) 基于人工智能与大数据的保护优化

人工智能和大数据技术的发展为继电保护的优化提供了新的技术路径。通过对大规模电网运行数据的分析，人工智能算法可以识别电网故障的特征，预测故障发生的可能性，并优化保护装置的动作策略。大数据分析能够实时分析电网中各类参数的变化趋势，为保护装置提供更加精准的预警信息。结合机器学习技术，继电保护系统能够根据历史数据自动调整保护策略，适应电网状态的变化，从而提高保护系统的可靠性和适应性。人工智能与大数据的结合，不仅能提高系统的响应速度，还能有效降低故障识别的误差率，确保可再生能源接入后电网的安全稳定运行。

(四) 微电网环境下的协调保护设计

微电网是可再生能源接入电网的一种重要形式，它通常由风电、光伏、储能装置等组成，能够在局部区域内独立运行，也可以与主电网连接。在微电网环境下，继电保护的设计需要考虑到多种可再生能源源的协同工作和系统内的动态变化。微电网的协调保护设计主要侧

重于如何在并网和孤立运行模式下，确保各类电源和负荷的保护设备能够高效配合，避免保护冲突或误动作。通过协调不同保护装置的工作原理，实现快速切断故障区域，保护其他正常区域不受影响^[4]。此外，微电网的实时监测和信息共享也是提高保护性能的关键。

四、发展趋势与未来展望

(一) 多能源协同下的继电保护系统演进

随着可再生能源的比例不断提高，电力系统中的多能源协同运行将成为未来电力系统的重要发展趋势。风电、光伏、储能等多种能源形式将通过智能调度和控制系统协同工作，而继电保护系统也必须向着更加灵活和高效的方向演进。在这种多能源协同的电网环境下，继电保护将不仅仅局限于对单一能源的保护，而是需要对多种能源的协调运行进行综合判断，确保各类能源在电网故障时能够快速响应并做出合适的保护动作。这要求继电保护技术在设计时考虑到不同能源的故障特性和电网动态变化，增强系统的适应性和智能化。

(二) 智能化继电保护的发展方向

智能化继电保护是未来电力系统发展的关键方向之一。随着人工智能、物联网、大数据等技术的不断发展，继电保护将向着更加智能化、自动化的方向演进。智能化继电保护系统能够基于实时数据进行自学习、自适应，自动优化保护策略，显著提高系统对动态故障的响应速度和准确性。智能化保护还能够实现与电网调度系统的协同工作，根据电网的实时状态动态调整保护策略，进一步提升电网的安全性和稳定性。未来，智能化继电保护将是应对可再生能源接入所带来的复杂电网环境变化的重要手段。

(三) 标准体系与技术规范的完善

随着可再生能源的快速接入，继电保护技术的规范化和标准化工作亟需加强。目前，许多国家和地区的继电保护标准主要依据传统电力系统设计，而对于大规模可再生能源接入后的电力系统保护仍缺乏统一的技术规范。因此，建立适应可再生能源特点的保护标准和技术规范，成为保障电力系统安全和稳定运行的重要基础。未来的标准体系将更加注重对多种能源形式、智能化设备以及新的保护技术的适应性，确保继电保护系统能够在多变的电网环境中可靠工作。此外，标准的国际化和跨国协调也将成为未来发展的趋势，促进全球电力系统保护技术的统一和进步^[5]。

(四) 系统级别的保护协同与集成发展

随着电网技术的不断发展，单一保护装置已经无法满足复杂电网环境下的安全需求。未来，继电保护将走向系统级别的协同与集成，形成一个多层次、多环节的保护网络。通过对电网中各个部分的实时监控和数据共享，不同保护设备能够协同工作，优化电网的运行状态。这种系统级的保护协同不仅能提高电网对故障的响应速度，还能在电网发生大规模故障时，通过智能判断和协同操作快速恢复电网的正常运行，确保电力系统的高效、安全运行。

结论

随着可再生能源的快速发展与广泛接入，电力系统的运行方式和结构发生了深刻变化，给继电保护系统带来了前所未有的挑战。传统的继电保护方法面临着故障电流幅值变化、保护定值整定复杂性提升、通信同步问题及并网不稳定性等多方面的困难。为应对这些问题，研究者提出了多种先进技术解决方案，包括自适应保护、广域测量系统、人工智能与大数据优化、以及微电网环境下的协调保护设计等。这些技术不仅提高了继电保护的响应速度和准确性，还增强了电力系统在动态环境中的适应能力。展望未来，继电保护技术将朝着更加智能化、系统化的方向发展，推动电力系统安全、稳定运行的同时，为更高比例的可再生能源接入提供技术保障。

参考文献

- [1] 管磊, 陶增辉, 陈松松, 等. 电力系统继电保护在新能源并网中的挑战与解决方案[J]. 电力系统装备, 2024(6): 15-16.
- [2] 彭寅章, 王海云, 王维庆, 等. 新疆电网风电基地110kV人工短路试验及结果分析[J]. 电力系统自动化, 2020, 044(001): 226-231.
- [3] 许耀琦, 唐萃, 陈天成, 等. 含分布式电源的配电网继电保护优化方案研究[J]. 电气应用, 2024, 43(11): 60-66.
- [4] 王伟杰, 曾鑫浩, 徐远途, 等. 基于正序突变量相轨迹辨识的可再生能源配电网电流保护[J]. 发电技术, 2024, 45(4): 753-764.
- [5] 吴煜昊. 智能电网中继电保护与电源协同优化策略研究[J]. 通信电源技术, 2024, 41(7): 121-123.