

高比例新能源接入下电力系统稳定性分析与控制策略

李玉珏

浙江正泰新能源开发有限公司, 浙江省杭州市, 310000;

摘要: 随着全球能源结构的不断转型, 风力发电、光伏发电等新能源在电力系统中所占的比例越来越大, 在电网运行上也发生了根本性的改变。新能源发电固有的间歇性和波动性给电力系统带来了频率稳定、电压稳定以及功角稳定的多方面问题。本文从高比例新能源接入电力系统带来的稳定问题入手, 对新能源发电对系统惯性、阻尼、短路容量等的影响进行了分析。根据稳定性分析的结果, 提出了虚拟同步发电机技术、储能系统协调控制、多时间尺度优化调度等先进的控制方案, 并且对区域电网互联和源网荷储的协同控制方法进行了研究。经过研究发现, 采用多种控制系统可以大大提高系统对扰动的抵抗能力, 保证高比例新能源电力系统的安全、可靠运行。

关键词: 新能源并网; 电力系统稳定性; 虚拟同步发电机; 协调控制

DOI: 10.69979/3029-2727.26.03.083

能源既是推动经济社会持续发展的物质基础, 又受到着化石能源即将枯竭和环境污染的双重限制, 在这样的大背景下清洁能源的发展被各国视为重要的战略抉择。我国提出 2030 年前碳达峰、2060 年前碳中和的目标, 风电、光伏的装机容量不断增大, 在某些地区新能源的装机比例已经超过了百分之五十。新能源发电依靠电力电子变换器实现并网, 在运行过程中和传统的同步发电机存在着本质的区别, 使得电力系统动态的行为更加的复杂。低惯量、弱阻尼、短路容量不够等越来越多的问题出现出来, 使电网安全稳定运行面临着前所未有的压力。怎样在保证电能供应可靠性的情况下充分接纳新能源发电, 是电力行业亟需解决的课题。

1 高比例新能源接入对电力系统稳定性的影响

1.1 系统惯量特性变化

传统电力系统依靠同步发电机组旋转质量提供的惯量来产生有功缺额时的转子动能来减缓频率的变化。新能源设备经过变流器与电网分离, 机械能的输出不能直接引起频率的变化。风电机组转速和电网频率是独立的, 光伏没有旋转部件, 都很难产生惯量。新能源渗透率的提高使得系统的等效惯性减小, 频率响应变差, 故障时的频率变化速率增大, 低频减载动作以及频率崩溃的风险加大。区域电网互联可以共享惯量, 但是受到联络线传输能力的限制, 不能完全弥补缺口, 而且由于新能源出力具有时空上的不均匀性造成惯量水平变化大, 使运行安排变得困难起来^[1]。

1.2 阻尼特性与功角稳定性

同步发电机的阻尼绕组可以产生阻尼转矩来抑制振荡, 但变流器输出特性由控制算法决定, 可能会出现

负阻尼, 造成次同步振荡损伤机组轴系。高比例的新能源接入使得同步机组数量减少, 整个系统的阻尼也变小了, 区域低频振荡的风险会增大, 需要对变流器控制参数进行精确的调节。新能源出力波动增大常规机组调节负荷, 极端情况可能会超过调节能力, 加大失稳风险; 直流输电换流站的无功损耗和换相失败, 也会对功角稳定性产生影响, 需要建立综合模型进行机电暂态仿真评价稳定裕度。

1.3 电压稳定与短路容量问题

新能源电站大多建在电网较弱的地方, 并且并网点短路比低, 系统强度小, 容易引起锁相环误差增大、功率控制精度降低、甚至失稳, 而且也会对保护装置的可靠性产生影响, 需要改进继电保护方案。风、光变流器可以提供一定的无功支持, 但是当有功出力很大时无功裕度会减小。故障期间新能源机组处于故障穿越模式, 有功受限、无功注入随电压下降而变化; 故障消除以后, 如果功率爬升率同系统的要求不一样, 会导致电压的恢复出现异常。统筹协调新能源机组、无功补偿装置等资源的调配与控制, 是保证电压稳定的条件。

2 高比例新能源系统稳定性控制策略

2.1 虚拟同步发电机技术

虚拟同步发电机就是解决新能源并网惯量缺失的方法之一。采用该技术时, 在变流器控制系统的数学模型中加入同步发电机的模型, 使得变流器外特性呈现出类似于同步机的惯量响应和调频调压能力。当系统频率发生偏移的时候, 控制算法根据虚拟惯量参数计算出功率增量, 利用改变变流器输出功率的方式来参与系统的频率调节。虚拟同步发电机控制有功功率同步控制和电压

源控制两种途径,前者以功率平衡方程为依据建立同步机理,后者直接模仿同步电势幅值、相位的变化来实现同步。储能装置的配合对虚拟同步发电机技术的实行很重要,由于风电机组在最大功率点处不能持续增加输出功率,需要储能系统来吸收能量。虚拟惯量参数和虚拟阻尼参数的整定会影响系统的动态响应品质,过大或者过小都会造成功率振荡。多台虚拟同步发电机并联运行的时候,各个机组之间功率的分配和暂态响应要协调一致,防止产生环流或者振荡现象。针对弱电网条件下虚拟同步发电机稳定性的问题,学术界提出了许多改善措施,如加入电流限制、改进锁相环设计、采用自适应惯量控制等等,目前研究成果正逐渐应用到工程实践中。部分厂家已经开发出了有虚拟同步功能的商业化的光伏逆变器和风电变流器产品,在新能源场站改造项目中得到了试验性的应用,运行结果表明该技术可以明显改善系统频率响应性^[2]。

2.2 储能系统协调控制

电化学储能系统功率响应快、控制灵活,是平抑新能源出力波动、提供辅助服务的最佳选择。电源侧装设一定比例的储能装置,可以使新能源场站出力平滑、跟踪调度计划等,减少对电网运行带来的影响。在电网侧,独立储能电站参加调频、调峰服务,在负荷低谷时储存多余电量,在高峰时期放出所需的支撑力。储能系统参加一次调频的时候,要按照目前的荷电状态来确定响应方式,防止由于不断充放电导致容量耗尽而失掉调节作用。储能和常规发电机组协调运行是实现系统经济高效运行的重要手段,它们在响应速度、调节精度、运行成本等各方面都有各自的优点,合理划分调节任务可以充分发挥各自的特点。针对储能荷电状态管理的问题,研究提出利用模型预测控制法来进行优化调度的方法,按照负荷预测、新能源出力预测来合理安排充电放电的计划,在满足系统调节需求的基础上延长储能系统的寿命。混合储能系统把各种不同的储能装置结合在一起使用,例如锂电池和超级电容相结合的配置方式,锂离子电池用来存储能量的时间较长,而超级电容则能应付快速变化的动力,在两者共同作用下总的储能性能要优于单独使用任一种类型的储能^[3]。

2.3 多时间尺度优化调度

高比例的新能源电力系统运行调度要在一个又一个的时间尺度上统筹协调,形成日前调度、日内调度和实时调度三级调度体系。目前调度按照次日负荷预测和新能源出力预测来决定常规机组的启停计划及发电计

划,并且留有充分的备用容量以应对预测偏差。日内调度在运行日中不断更新预测信息,按照实际情况对发电计划进行调节,优化系统的运行方式。实时调度是在分钟级或秒级的时间尺度上调节系统功率偏差,主要是依靠自动发电控制系统来实现的。新能源出力预测精度关系到调度的决策质量,气象预报技术和人工智能方法的应用使短期预测准确性大大提高,但是超短期预测仍然有很大的不确定性^[4]。为了对付预测误差,调度模型一般都会采用随机优化或者鲁棒优化的方法,在保证安全约束满足的情况下寻求经济性的最优化。跨区域电网互济是消纳大功率新能源的一种途径,不同区域内新能源出力的时空互补性可以平滑总出力曲线,减小系统调节的压力。区域间的联络线调度要统筹多方利益,创建合理市场的交易规则来保证资源的有效配置。智能电网技术给精细化调度提供技术支持,广域测量系统可以让调度机构及时地了解电力系统的运行状况,高级计量基础设施给需求侧响应打下数据基础,大数据分析机器学习技术能提高预测的准确度和决策的速度。

3 系统协同控制与未来发展

3.1 源网荷储协同控制

源网荷储协同控制是应对大量使用新能源的方案,是以电源、电网、负荷、储能这四个部分整体优化和互相配合来达成目的的方式。电源侧要提高新能源机组的主动支撑作用,使它由原来的被动服从电网调度指令变为现在的积极参与系统的调节,并且保持必要的常规电源以作支撑。电网侧依靠拓扑优化、柔性输电设备的使用来提高网架的输送能力和灵活调节的能力,正确配置动态无功补偿装置和调相机,提高系统短路容量水平。负荷侧发挥需求响应的潜力,即工业可调负荷、电动汽车充电、蓄热蓄冷设备等柔性资源参与到电网的互动当中,在电力供应紧张的时候自动降低用电量,在新能源大发的时候增加消纳。储能是联系各个部分的纽带,既可以部署在电源侧辅助新能源并网,也可以配置在电网的关键节点供给调节服务,还可以以分布式的形式介入到用户的能量管理中。协同控制要实现就必须要有完善的信息网路和智能化的控制系统,在实时收集各种资源运行信息的基础上,统一制定控制方案然后下发给各个控制器去执行。

3.2 区域电网互联与支撑

我国能源资源分布和负荷中心是逆向的,西部、北部风能、太阳能资源丰富,而东部沿海地区负荷密度大,两地之间的跨区输电对提高全国电力资源配置效率起

着重要的作用。特高压直流和交流输电技术是实现远距离大容量输送电能的工程技术途径,已建有多条跨区输电通道,在新能源送出及余缺互济中起到重要的作用。直流输电系统可以实现异步联网,两个系统频率解耦,利于分别控制,但是会消耗大量的无功功率,给交流系统的电压支撑带来压力。多端直流、直流电网技术的发展给更灵活的功率调节留出了空间,柔性直流输电技术在控制精度和响应速度上具有明显的优势,适合于新能源丰富地区电力输出。交流互联电网的惯量资源可以在区域之间共享,在发生故障的时候互联系统可以给整个系统提供紧急功率支援,提高系统的抗扰动能力。区域间联络线输送功率的优化调度要建立协调机制,平常实行经济功率交换,在紧急情况下迅速调动支援功率。随着新能源装机规模的进一步增大,现有的输电通道会遇到容量瓶颈,在这种情况下要提前做好新建输电工程的工作或采用先进的输电技术来改造已有线路^[5]。

3.3 关键技术的发展趋势

为了实现更高的新能源比例的目标,电力系统的稳定分析及控制技术也将不断进化。构网型变流器技术成为目前的研究热点,和传统的跟网型控制不一样的是,构网型变流器可以自主地建立电压频率参考,在没有常规电源支持的条件下就可以自动生成稳定的电网,是实现100%新能源电力系统的关键所在。人工智能以及机器学习方法给负荷预测、设备故障检测、控制策略优化等带来了很好的发展前景,深度强化学习算法可以依靠实时的运行状况来自动调节控制参数,加强系统面对复杂环境适应性的程度。数字孪生技术把物理电网和数字模型紧密地融合在一起,在高保真的模拟预测出系统的行动之后,来辅助运行的决定以及风险的预告。电力电子装备的可靠性提高和成本降低会促进柔性输配电技术更加广泛地使用,统一潮流控制器、静止同步补偿器等装置对于提高系统的调节能力有着特殊的优势。储能技术路线多种多样,除了锂电池之外,压缩空气储能、液流电池、氢储能等技术也逐渐走向成熟,给不同的应用提供更多的选择。电力系统仿真分析的方法要符合新形势的要求,机电暂态和电磁暂态混合仿真技术可以更准确地反映含大量电力电子设备的系统动态。

4 结束语

高比例的新能源接入给电力系统运行特性及稳定性带来了根本性的改变,传统的分析方法和控制手段不能适应了。本文从频率稳定、功角稳定、电压稳定这三个方面出发,对新能源大规模并网所造成的负面影响和挑战进行分析,研究了虚拟同步发电机、储能协调控制、多时间尺度调度等关键的控制策略,还提出了源网荷储协同、区域互联等系统的解决方案。研究表明,单一的技术手段不能很好地解决高比例新能源系统稳定性的问题,应该从规划设计、运行控制、市场机制等各个方面综合采取措施。伴随着新能源的渗透率不断升高,构网型变流器、人工智能控制、数字孪生等前沿技术在保证系统安全稳定运行上所起的作用会越来越大。电力行业要提高技术的研发能力,加强工程示范,不断完善标准化建设,推动我国的电力事业向清洁低碳、安全高效的绿色发展道路前进。

参考文献

- [1] 辛保安,袁志昌,李明节,等. 新型电力系统稳定分析与控制研究综述[J]. 中国电机工程学报, 2023, 43(14): 5453-5471.
- [2] 孙华东,许涛,郭强,等. 高比例电力电子电力系统振荡机理与特性分析[J]. 电力系统自动化, 2023, 47(9): 1-15.
- [3] 年珩,杨德友,邹见效,等. 高比例新能源并网系统电压稳定性分析与控制综述[J]. 电工技术学报, 2023, 38(17): 4537-4552.
- [4] 袁小明,程时杰,胡家兵. 电力电子化电力系统动力学问题研究——理论、方法与实践[J]. 中国电机工程学报, 2022, 42(7): 2448-2462.
- [5] 康重庆,杜尔顺,郭鸿业,等. 新型电力系统“源网荷储”协同规划研究综述与展望[J]. 电力系统自动化, 2023, 47(8): 1-18.

作者简介:李玉珏,出生年月:1997年11月,性别:男,民族:汉族,籍贯:云南省宣威市,学历:大学本科,职称:助理工程师(初级职称),研究方向:电力系统及其自动化。