

新能源（风电/光伏）高比例并网对区域电力系统稳定性的影响及协调控制策略研究

甄籽成

安徽骏阁建设工程有限公司，安徽省六安市，237000；

摘要：随着新能源高比例接入电力系统，其安全稳定问题日益突出，如何协调新能源和传统电源，减少新能源高比例接入对电力系统安全稳定运行的影响成为当前电网面临的重大挑战。本文从电力系统稳定性影响机理出发，提出了一种新能源高比例并网区域电力系统稳定性评估方法，并以典型区域系统为例进行了仿真分析。在此基础上，本文提出了一种储能系统与需求侧响应相结合的多能互补与综合调控策略，并进一步提出了一种储能系统与需求侧响应协调控制策略。通过对所提出的协调控制策略进行仿真分析，验证了其在抑制新能源高比例并网对电力系统稳定性影响方面的有效性。

关键词：新能源（风电/光伏）高比例并网；区域电力系统；稳定性；协调控制策略

DOI：10.69979/3060-8767.25.09.067

引言

在全球能源互联网发展战略的引领下，新能源并网比例不断提高，以风电、光伏发电为代表的新能源发电装机规模已居全球首位，截至2020年底，中国新能源发电装机达3.7亿千瓦，占总装机容量的36.2%，较2015年增长了约8个百分点。然而由于新能源发电具有间歇性、波动性和随机性的特点，随着新能源装机规模的不断扩大和比例的不断提高，新能源高比例接入电力系统必将给电网安全稳定运行带来诸多挑战。本文基于电力系统稳定性理论，从系统潮流分布、系统电压稳定、系统频率稳定等方面研究了新能源高比例接入对电力系统稳定性的影响机理分析方法。

1 新能源高比例并网现状及挑战

2019年底，我国新能源装机容量占发电总装机的比重首次超过50%，达到51.1%，并呈现出快速增长的态势。截至2020年底，全国新能源发电装机容量达到3.7亿千瓦，其中风电装机2.1亿千瓦、光伏发电装机2.4亿千瓦。新能源高比例并网对电网的影响主要体现在以下三个方面：（1）系统潮流分布发生改变；（2）系统电压稳定和频率稳定面临挑战；（3）系统频率稳定性恶化。从当前的发展情况看，新能源高比例接入给电网带来了较大的挑战，其中如何协调新能源和传统电源成为当前电网面临的重大挑战^[1]。

2 风电、光伏高比例并网发展现状

2021年6月，国家能源局在《关于2021年能源工作指导意见》中提出“到2025年，风电、光伏发电装

机规模分别达到12亿千瓦、18亿千瓦以上”的目标。2022年6月，国家能源局印发了《“十四五”现代能源体系规划》，提出到2025年，非化石能源占一次能源消费比重达到25%左右。与此同时，为了适应新能源高比例并网的发展趋势，国家电网公司、华能集团、大唐集团、华电集团等国内电力央企以及国内主要省份均出台了新能源发电规划及配套电网规划^[2]。

2.1 动态稳定性影响分析

新能源并网引起的潮流分布改变对系统电压稳定性产生影响。当新能源高比例接入电力系统后，系统中会出现大量的风电、光伏机组，使得系统中的有功功率呈现出明显的波动性和随机性，进一步导致电网中出现电压波动、电压跌落等现象。当新能源高比例接入电力系统后，由于其出力波动性，使得系统中出现不同程度的电压跌落现象，进而引起电网频率波动，影响电力系统频率稳定。

2.2 电压稳定性影响分析

随着新能源装机比例的逐渐增大，其对电网的电压稳定影响也会逐渐增大，具体体现在以下几个方面：（1）风电、光伏发电出力波动性较强，可能会引起系统电压的不稳定。（2）风电、光伏发电具有间歇性和波动性，随着新能源机组容量的不断增大，其对电网电压稳定性的影响也会越来越大。（3）风电、光伏发电出力的波动性可能会引起系统电压失稳，这主要是由于新能源机组并网后会导致电力系统内电压不平衡，进而引发电力系统电压失稳。（4）风电、光伏发电出力的波动性可

能会引起系统内功率波动,这不仅可能会影响电网的安全稳定运行,而且可能会引发连锁反应^[3]。

2.3 频率稳定性影响分析

新能源高比例接入电力系统后,其出力的波动会造成电网的频率波动。当电网中存在新能源机组时,其出力变化对系统的频率影响主要体现在以下两个方面:(1)新能源机组出力变化可能会引起系统中功率出现不稳定的现象,进而影响电力系统中的功率平衡,进而对系统频率稳定性产生影响。(2)由于新能源机组出力的波动性以及其自身固有频率特性,可能会在一定程度上降低电力系统中的频率稳定性。具体来说,新能源机组出力波动会造成电力系统中各子系统之间存在一定的扰动,进而引起电力系统中频率的变化,进而影响电力系统频率稳定性。

2.4 冲击与扰动特性分析

以风电、光伏并网系统为研究对象,在电力系统稳定仿真软件中建立仿真模型,分析风电、光伏并网系统中的各类冲击与扰动特性。分析表明,当新能源并网容量增加时,在新能源出力波动较大时,并网系统的频率变化率会显著增加;而当风电、光伏发电的出力波动较小时,风电、光伏发电出力波动对系统频率稳定性的影响较小;风电频率稳定性的影响主要是通过改变频率变化率和频率响应曲线的相位差来实现的;当风电、光伏发电出力波动较大时,通过改变发电机转差率的方式来改变频率响应曲线上各个点的相位,从而实现了频率的快速调节。

3 区域电力系统稳定性评估方法

3.1 稳定性评价指标

本方法主要基于系统功角稳定性、电压稳定性、频率稳定性三个方面来评估新能源高比例接入区域电力系统的稳定性,具体分为两个部分:第一部分为系统功角稳定性评估,即通过计算系统的功角稳定性指标来评价系统的功角稳定性,从而判断电力系统中是否存在失稳问题;第二部分为电压稳定评估,即通过计算系统电压稳定指标来判断电力系统中是否存在失稳问题。在本方法中,所述三个方面分别采用了时域仿真法、基于小干扰分析的暂态稳定指标和基于小扰动分析的暂态稳定指标三种不同的评估方法,并分别在不同场景下对三个评估指标进行了验证^[4]。

3.2 建模与仿真方法

针对新能源高比例并网区域电力系统稳定性评估方法,本文以华东电网为研究对象,在 MATLAB/Simuli

nk 平台上建立了华东电网典型区域系统的仿真模型。系统的仿真模型包括了新能源发电、火电机组、调速器、负荷等子系统,仿真中采用了多机系统中的静态负荷模型与动态负荷模型。在仿真过程中,本文分别采用了时域仿真法和小扰动分析法来评估新能源高比例并网对华东电网稳定性的影响。在此基础上,本文提出了一种储能系统与需求侧响应相结合的多能互补与综合调控策略,并进一步提出了一种储能系统与需求侧响应协调控制策略。

3.3 典型区域系统案例分析

以中国南方某典型区域为例,以 500 kV 线路为边界,按分区进行稳定性评估分析。该区域负荷中心负荷主要为工业负荷,由四个不同电压等级的 110 kV 变电站向各分区供电。该区域风电和光伏发电总装机容量为 5 565 MW。本案例中,按照分区进行稳定性评估的原因是:(1)按照分区对系统进行稳定性分析,可以将该区域划分为四个不同电压等级的电网,而各分区内新能源装机规模及所占比重均存在较大差异;(2)不同分区内新能源装机规模及所占比重存在较大差异;(3)不同分区内不同电压等级电网之间的互济能力也有较大差异。

4 协调控制策略研究

4.1 新能源并网控制技术(如:虚拟同步机、无功优化等)

以提高电网电压稳定性和电能质量为目标,提出虚拟同步机(VSG)并网控制策略,通过控制风力发电机组虚拟为一台发电机,提高电网频率和电压的稳定性。建立基于 VSG 的光伏、风电并网系统模型,基于实时运行数据分析不同运行工况下 VSG 控制参数对系统运行的影响。以提高系统暂态稳定性为目标,研究风电、光伏并网系统的无功优化控制策略。针对风电、光伏发电功率波动特性,设计多目标粒子群优化算法,实现风电、光伏发电功率的无功优化控制。

4.2 主动电网管理与调度策略

在电力系统中,新能源是相对独立的发电单元,其出力与电网运行方式紧密相关,因而需要结合电网实际情况进行主动电网管理与调度策略研究。根据区域电力系统特征,在考虑电网安全稳定运行的基础上,研究新能源出力与电网运行之间的耦合关系,建立主动电网管理与调度策略,制定优化的发电计划,优化控制新能源发电出力。根据新能源发电特征以及系统安全稳定运行需求,制定主动电网管理与调度策略。对于主动电网管

理与调度策略中涉及的新能源发电、储能、配电网等相关技术研究进行研究,实现新能源发电与系统运行的协调优化控制。

4.3 储能系统与需求侧响应协调

需求侧响应是指用户改变自己的用电行为,实现减少自身用电负荷的目的。其主要包括节能降耗、改善环境、提高能源使用效率和增加用户经济效益等目的。通过用户需求侧响应,可降低电力系统的总负荷,同时使系统运行在经济状态下,在一定程度上达到“削峰填谷”的目的。需求侧响应的实现需依靠储能系统来实现。一方面,储能系统可以将新能源发电所产生的多余能量存储起来,从而减少电力系统中可再生能源的弃电量;另一方面,储能系统可以在负荷高峰时期释放储能电池储存的能量,从而降低电网对其他负荷的需求,保证电网安全稳定运行。

4.4 多能互补与综合调控方案

如前所述,风电和光伏发电具有较大的波动性和不确定性,为平抑新能源发电波动,需要对新能源进行就地消纳。然而,新能源的出力受天气变化影响较大,且受电网调度影响较大,当电力系统发生扰动时,不能有效平抑新能源波动。因此,为了实现多能互补与综合调控,可以通过如下方法来实现:针对风、光资源丰富地区,建设集风电、光伏发电和储能于一体的多能互补与综合调控系统。在电力系统中引入储能系统和需求侧响应技术^[5],实现能量的双向流动。建立“源-网-荷-储”协同的综合调控体系,通过统一调度模式实现多能互补与综合调控。考虑储能系统和需求侧响应的协同调度,构建风、光、电和需求侧参与调控的协同运行机制,提高新能源消纳能力,平抑新能源波动。在现有电力调度体系的基础上,建立风、光、电和储能系统参与的新能源综合调控模型,对风和需求侧资源进行有效调度。以某省级电网为例,当电网发生故障时,负荷将会有所波动,而储能系统可以有效平抑负荷波动,降低停电损失。在储能系统和需求侧响应技术的协调下,可以实现在不停电的情况下对新能源进行有效消纳。通过仿真结果可以看出,该方案有效地提高了电网的安全稳定性能。

4.5 协调控制策略的实现与优化

为保证协调控制策略的实时性与有效性,针对实际中可能存在的各种情况,在新能源并网控制策略中需要考虑以下几个方面:考虑到协调控制策略是多个区域电网共同制定的,需要考虑不同区域电网间的联系,可考

虑将各个区域电网作为整体进行优化,如:当各区域电网有功负荷较大时,可采用总发电功率作为参考值;当各区域电网有功负荷较小时,可采用各区域电网的有功功率作为参考值。考虑到新能源并网过程中可能出现的随机因素,需要对协调控制策略进行实时修正。根据实际情况进行必要的优化调整,使协调控制策略更加符合实际情况。考虑到协调控制策略是多个区域电网共同制定的,为了保证多个区域电网的共同利益,需要对各区域电网的有功、无功调节能力进行分配,可采用“统一控制、分级调控”的方式来实现。统一控制是指在制定协调控制策略时,将新能源出力信息等相关信息通过区域电网内的通信系统传送到统一控制中心,再由统一控制中心统一进行调度分配。分级调控是指当区域电网内出现紧急情况时,如电压跌落、故障停电等情况时,协调控制中心可以通过通信系统将紧急情况传递到各区域电网内进行处理。最后,根据实际情况对协调控制策略进行适当的调整。

5 结语

在电力系统中,新能源发电具有较大的波动性和不确定性,若不加以控制,新能源发电出力的波动会严重影响电力系统的稳定性。本文以华东电网为研究对象,在考虑新能源发电出力波动与电力系统安全稳定运行需求的基础上,提出了一种基于主动电网管理与调度策略的新能源高比例并网区域电力系统稳定性评估方法,并进一步提出了一种储能系统与需求侧响应相结合的多能互补与综合调控策略,提出了一种储能系统与需求侧响应协调控制策略。所提协调控制策略在华东电网仿真分析中验证了其有效性和可行性,可为风、光发电接入区域电力系统提供参考。

参考文献

- [1] 殷越洋.面向新型电力系统稳定性提升的源网协调控制策略研究[D].浙江大学,2024.
- [2] 殷天然.提高电力系统暂态稳定性的UPFC协调控制策略研究[D].东南大学,2018.
- [3] 吴国彬,张俊涛,陈建宇.基于多时间尺度协调控制的风光储联合系统稳定性与优化运行策略分析[J].仪器仪表用户,2025,32(06):89-91.
- [4] 谢仁民.分布式电驱动汽车轨迹跟踪与稳定性协调控制策略研究[D].吉林大学,2025.
- [5] 江守其,张海峰,付贵,等.提升光储并网系统频率稳定性的协调控制策略[J].电力建设,2025,46(08):138-149.