



规模化新能源开发利用 对电力系统安全的影响

文 / 华北电力大学新能源电力系统国家重点实验室主任 刘吉臻

规模化开发利用新能源 必然催生新能源电力系统

我国作为世界人口大国和能源消费大国，经济增长压力和节能减排压力巨大。对我国而言，大规模开发利用新能源一方面是应对能源环境危机、转变经济发展方式的有效手段；另一方面是抢占未来产业发展制高点、提高国际竞争力的重大举措。根据国家能源局的统计，截至 2015 年年底，我国并网风电累计装机达到 1.29 亿千瓦，同比增长 34.2%，占全部发电装机容量的 8.6%；太阳能光伏发电累计并网容量达到 4158 万千瓦，同比增长 67.3%，约占全球的 1/5，超过德国成为世界光伏第一大国。预计到 2030 年，我国风力发电装机与太阳能发电装机

均将超过 4 亿千瓦。

随着风电、太阳能发电等新能源电力的开发利用，接入电网的新能源电力比重日益提高。众所周知，电力的基本特征是难以大规模储存，电力的生产与消费必须同步进行。电力系统通过统一的调度指挥，使电力的生产跟随负荷需求的变化，保证电能的实时供需平衡。当发电侧的可调度容量难以达到负荷侧需求以及发生可能影响电网安全稳定的情况时，电力调度中心将采取切除用户负荷等措施，保证电网安全稳定运行。

对于传统的火电、水电、核电、油/气发电而言，发电单元一般具有良好的可调度性能。发电机组在一定的容量范围内可以按照电网调度指令

变更发电功率。因此，在发电装机容量可满足用户最大负荷的前提下，整个电力系统是可调可控的。

风电、太阳能发电区别于传统发电的一个重要特征在于它的随机波动性。由于产生电力的一次能源来自于自然界空气的流动与太阳光的辐射，不仅不可储存，而且受到季节、气候和时空等的影响，具有很强的随机波动性和间歇性，因此，对于具有一定装机容量的新能源发电单元来说，其实际出力首先取决于现时刻的风力、太阳光强度的约束。当风电、太阳能发电规模化接入电网后，电力系统就必须在随机波动的发电侧与随机波动的负荷侧之间实现电力的供需平衡，保持电网的安全稳定。

新能源电力的另外一个重要特征在于它的能量密度低。例如：当风速为3米/秒时，其能量密度为20瓦/平方米左右，而太阳能即使是在天气晴朗的正午，太阳垂直投射到地球表面的能量密度仅为1000瓦/平方米左右，这样使得新能源发电设备的单机容量不可能过大。大量的小容量发电机组接入电网，使电力系统受控发电单元呈爆炸性增长趋势。截至2015年年底，我国火电机组累计装机99021万千瓦，单机6兆瓦及以上的火电机组总数约为8300台；同期，风电机组的装机总量达到1.29亿千瓦，装机数量却达到了92981台，是火电机组数量的11倍还多。按照我国风电装机2030年将超过4亿千瓦的规划，以目前风电的平均单机装机容量来计算，到时需要并入电网的风电机组数量将超过28万台！

因此，随着新能源电力的规模化开发和电网中新能源电力比重的增加，传统电力系统的基本特征与运行控制方式发生根本性变革，催生出新能源电力系统。

新能源电力系统的基本特征

新能源电力系统的基本特征主要体现在以下几个方面：

一、随机性

传统电力系统的随机性主要在于用电负荷的随机性。风电、太阳能发电的随机波动性、间歇性使电力系统必须同时应对来自用电负荷侧与发电侧的随机波动性。迄今为止，新能源

电力在整个电网中所占比例相对较小，电力系统调度控制把这部分电源的随机波动性视为负荷侧的随机波动性，依赖传统发电单元的可控可调性加以平抑。

随着我国局部区域电网中新能源电力比例的提高，为了保证电网的安全稳定，造成了电网不能全额接纳具有随机波动性的新能源电力。在特定条件下，部分新能源电力不得不被舍弃。随着风电装机的快速增加，弃风比例可能还将进一步提高。

二、可控性

从大系统理论出发，电力系统是一个受控设备众多、地域分布广阔、运行控制精度要求高、内外部未知扰动多的复杂巨系统。传统电力系统通过发电单元控制、电网分级调度控制等技术解决了复杂电力系统的运行控制问题。新能源电力的快速发展使电力系统中发电单元数量急剧增长，系统中可调度容量与可调度电量所占比例大幅度降低，系统中的随机扰动性进一步增强，造成系统可控性降低，控制难度加大。

三、安全性

电力系统的安全性直接关系到国家经济社会的安全，保障电力的安全可靠供应是电力系统的首要任务。随着新能源电力设备的急剧增加，再加上这些电力设备地域分布广、气候环境恶劣、接入电网电源点分散，与传统电力系统相比，系统设备发生事故与故障的几率更高，大大增加了整个电力系统的安全风险。随着大量电力

电子器件的使用以及对网络信息系统的依赖，也使电力系统的安全风险进一步增加。

四、整体性

传统电力系统一般划分为发电、输配电与供用电三个部分，三者按照生产流程既相互关联又相对独立，通过调度中心形成一个有机的整体。随着新能源电力在电力系统中比重的上升，电源与电网之间、电源与电源之间、电网与负荷之间的关联性大大增强。比如传统火电、水电等发电单元具有一次能源可储、可调度性好的特征，利用传统发电单元的可调度性可以平抑风电、太阳能发电的随机波动性。因此，传统发电除了其基本的发电属性外，还具有可调度性好、补偿新能源发电随机波动性的属性。在电网调度中心的统一调配下，充分挖掘传统发电单元的可调度性，形成多能源互补的网源协同、源源协同机制，才能使新能源电力得以规模化开发利用。又比如，将用电负荷中的可平移部分（即可平移负荷）视作一种能够参与电网调度的资源，形成智能化的新型用电方式，有助于实现规模化新能源接入条件下的电力系统能量平衡与安全稳定。这将使电力系统的发电、电网与用电之间更加紧密地形成一个整体。

五、智能化

对新能源电力系统智能化的理解主要体现在两个方面。一方面，工业化与信息化的融合促进了现代社会向着网络化、数字化与智能化发展，比如智能制造、智能交通、智能电网乃

至智能城市等等。就智能电网而言，就是通过网络化、数字化与智能化技术，使电力的生产与供应更加高效、更加便捷、更加可靠、更加清洁，建立起人与自然更加和谐的能源电力生产、供应与消费模式。另一方面，实现新能源逐步取代化石能源的变革需要依赖网络技术、数字技术与智能控制技术的支撑。比如集中式与分布式新能源发电与并网、电动汽车与储能、需求侧资源利用、新型电力市场、电力网故障下的自愈与恢复等等，都需要建立在先进的网络信息系统、智能控制与管理系统以及大数据处理、云计算等技术的基础上，从而成为有效解决当今能源电力问题、发展新能源电力的有效手段。

规模化开发利用新能源与电力系统安全

电力系统安全一直是电力工作者首要关心的问题。随着新能源电力的规模化开发以及电网中新能源电力比重的增加，新能源电力系统的特征将日益凸显，给电力系统安全带来了一些新的问题，同时出现一些新的技术趋势。

一、随着电网中新能源电力比重增加及直流输电的大规模投产，电力系统呈现出新的动态特征，需要新的建模与分析方法。

新能源、直流输电快速发展，使得电力电子装置在源、网、荷侧系统中所占比重均日益增加。电力电子装置具备快速动态响应特性，使传统电

力系统以工频相量为基础的建模分析方法面临挑战。按照系统动态过程的时间尺度，分解为相互独立电磁暂态、机电暂态以及中长期动态仿真分析也已逐渐不能满足现代电力系统的要求，涵盖源网荷电力系统的全过程仿真成为研究的热点问题之一。与此同时，传统电力系统分析方法以确定性分析为主，如何表征大规模新能源电力的随机性，并分析其对电力系统安全的影响也是一个值得关注的问题。

二、电力系统的运行控制方式可能发生变更，将在集中与分布之间寻找新的平衡点。

随着区域电网间交直流输电线路建设进程的推进，大电网之间的耦合日益紧密，电力系统整体性特征日益突出，因此在相当长的一段时间内，集中运行控制模式对于大范围消纳新能源电力、保障系统安全仍将起着重要的作用。然而随着新能源电力与智能电网的发展，未来电力系统控制对象急剧增长，特别是海量分散用户参与到需求侧调度后，将给集中运行控制模式带来挑战。因此，国内外学术界正在探索集中协同—分布自治的新模式，可以预见，未来电力系统运行控制模式势必将在集中与分布之间寻找新的平衡点，从而更充分利用集中优化与分布决策各自的优势。

三、电力系统发生系统性事故的风险逐渐增大，协调多种控制手段的系统性保护提到议事日程。

伴随特高压交直流工程相继投产，特别是特高压直流输电规模的快速发

展，一旦交流系统发生常见的单相短路故障，就有可能引发多回直流同时换相失败，电网将面临送、受端功率不平衡而导致严重的稳定性事故或大量切机、切负荷的风险；含多直流馈入的受端电网，其直流线路间的相互影响以及受端电网的电压稳定性问题，正成为制约电网安全稳定运行的新瓶颈；含大规模新能源电力的送端电网，也有可能由于电网扰动导致新能源电力设备大面积切除，进一步扩大事故影响范围。因此，协调直流、交流、各类电源与负荷等多种控制手段的系统性保护成为当前研究的热点问题。

四、能源系统与信息技术深度融合成为未来发展趋势，模型分析与数据分析并重，将成为发展新能源电力、保障电力系统安全的有效手段。

正是由于现代电力系统动态特征更加复杂多变，以电网元件建模为基础，完全依赖模型分析的方法已受到越来越多的局限。与此同时，电网部署了众多的数据采集与监测系统，包括 SCADA 系统、PMU/WAMS 系统和故障信息系统等，提供了大量的系统实测数据；未来随着电网与用户互动的增加及相关信息采集系统的建设，还将提供更多数据源，基于数据分析的技术得到了人们的关注。但是二者不可能相互取代。以模型分析为基础，应用大数据处理、云计算等新技术，挖掘未来电力系统未知的现象与规律，实现电力系统态势实时感知与精准协同控制，将成为发展新能源电力、保障电力系统安全的有效手段。●