

从未来的电网体系结构来看，功率平衡区是虚拟电厂的范式。

从未来电网体系结构看虚拟电厂

文 / 余贻鑫

能源革命的实现高度依赖于未来高比例的可再生能源系统，特别是就地开发、就地消纳的分布式可再生能源。随着电源和负荷类别的多元化和分散化，为了保证功率的平衡，虚拟电厂这一可参与电网的调度运行、可为电力市场提供能量和灵活性服务的管理系统应运而生。在电力供需不平衡时，虚拟电厂将发挥削峰填谷的作用。在成熟的电力市场环境下，它可以带领小型电厂和生产型消费者进入大型市场，使其能够参与电力交易。

电网结构的集中与分层分群

随着我国“双碳”目标的提出，电源结构将从以化石能源为主逐渐过渡到以清洁、可再生的风电、水电、光伏发电以及光热等为主。分布式发

电、用电电气化和灵活负荷的充分利用是电力的未来，也是能源的未来。

4月26日召开的中央财经委员会第十一次会议提出“发展分布式智能电网，建设一批新型绿色低碳能源基地，加快完善油气管网”。可以看出，分布式智能电网的发展也开始提速。

虚拟电厂是分布式资源主体参与市场的一种形式，不论是研究虚拟电厂，还是分布式智能电网，首先要研究电网的体系结构，它是电网的最顶层描述（模型）。考虑电网问题必须优先考虑体系结构。

当前，我国的电网结构和体系已经与20世纪电网发展所依据的基本原理和假设有所不同。早期的电力系统采用了统一电力系统的发展模式。建

立结构合理的大型电力系统不仅便于电能生产与消费的集中管理、统一调度和分配，减少总装机容量，节省动力设施投资，提高系统运行的安全性和稳定性，而且有利于地区能源资源的合理开发利用，更大限度地满足地区国民经济日益增长的用电需求。

传统的集中控制模式能够处理数百甚至数千个监测点和控制点的信息，当独立系统的规模进一步扩大时，集中控制模式就难以适应了，于是20世纪20年代至50年代互联系统模式应运而生。互联系统由若干电力系统组成，通过联络线或其他设备连接起来，并建立了互联的标准。互联系统发电和潮流控制理论提出了“控制区”的概念，后来更名为平衡区，意指区域内电功率能够保持近乎瞬时的



从电网的安全角度出发，各平衡区之间进行协调，产生平衡区间的功率交换计划，各群必须履行在此计划中所规定的任务。

净功率平衡。

平衡区的运行规范可概括为：每个平衡区有义务维持其对外的和事先约定的交易日的计划功率，同时其内部发电的调节需要随时吸收其自身负荷的变化（即净功率平衡），即使在该区域内有大的扰动时，也需达到此标准，平衡区如何运作以完成该目标是其自己的事。历史上，统一电力系统实际上是单平衡区系统。从电网的安全角度出发，各平衡区之间进行协调或者优化，产生平衡区间的功率交换计划，各群必须履行此计划中所规

定的任务。以我国西北地区为例，从西部往东部传输可再生能源时，直流输电功率并非随着西北地区风光发电出力的波动而波动，实际上是相对平稳的。

由于我国的电网系统一直置于高压输电系统的能量管理系统下，覆盖了众多的发电机组和变电站，数十年来，在管理和控制电力系统以确保其经济可靠运行方面取得了巨大成功。但如果将这个系统和它的底层集中操作范式扩展到配电系统，并扩展到未来电力系统中成千上万个生产型消费

者，就会导致效率和可靠性降低。

对于如何解决这一问题，有人提出设想：未来的配电网、微电网、建筑单元（大楼、工厂和住宅等）与输电系统的差异将逐步消失，具有本地发电和双向电力潮流的特点，且都将配有能量管理系统，并按照集群（cluster）的理念实现各自的净功率平衡。其实这里所谓的群就是前述的平衡区，其所对应的智能电网就是分布式智能电网。

互联输电系统是若干个平衡区（即区域性输电网）互联起来的群集（clusters），每个平衡区是一个集群；每个区域性输电网是若干个配电网互联起来的群集，每个配电网是若干个微网、建筑单元组成的群集，每个微网又可以由若干个建筑单元互联起来的群集，由此形成多层的群集层次结构。如果这个图扁平化，则形成群集嵌套。

与平衡区相似，每个集群都有发电或负荷、智能控制（能量管理系统）和通信功能。集群的基本功能包括：进行发电或负荷调度；当地的反馈控制，以用于平滑波动；通过削减发电或负荷来缓解故障。

分层分群的概念看似与当今的电力系统并无太大不同，但一个关键区别是，潮流不再只是从大型电力系统到用户的单向流动。首先，配电系统或大电网上的大多数节点乃至终端用户的电表都可以注入和输出功率，并且可以在这两个模式之间平稳地切换。其次，这些特点再加上不同规模的经济高效的储能，变革势在必行，

其中至少要对配电系统运行进行变革。从大系统和批发市场运营商的角度来看，他们希望每个输电和配电接口都可以在充当负荷节点和充当供应节点之间切换运行方式。

美国西北太平洋国家实验室通过分层优化解耦研究，也确认了这种分层分群的电网体系结构。本质上，所有群协作作为一个常见的优化问题，定会产生必要的协调信号。在局部，每个群都可以使用协调框架内的本地目标和约束条件来执行优化。需要强调的是，上述分层分群的电网体系结构不需舍弃成功的能量管理系统或运行良好的输电系统的网络运行的做法，仅是使其变得更简单（对外围设备不承担任何责任）。

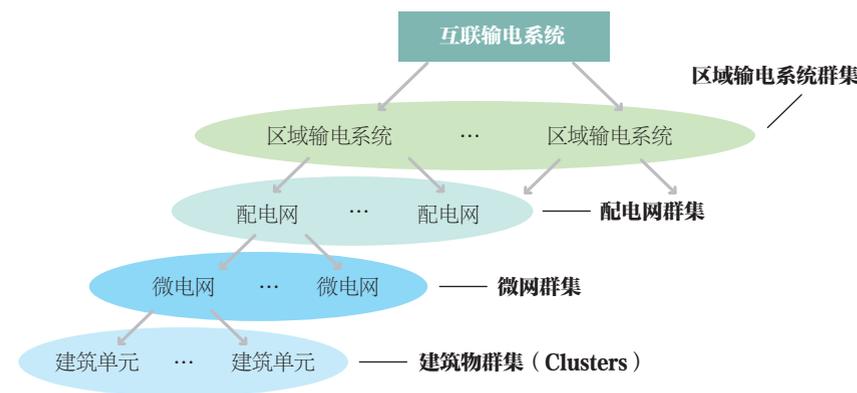
对能源清洁低碳转型有积极作用

虚拟电厂的概念与实践对分布式电源发展、能源清洁低碳转型有着积极意义。

电网被认为是20世纪最伟大的发明，而互联网则是21世纪最伟大的创新。互联网是智能的，可以轻松地适应接连不断的具有颠覆性的信息革命快速变化的情景。在新的电力时代，电网也将像互联网一样智能化。

互联网之所以智能，因为它是从全球互联网到局域网这样一个网络结构。这样一种分群分层方式的构造，使得网络责任分摊成为可能。每一个互联网子域的协议栈都是分层结构，有应用层、传输层、网络层、通信层。这些子网络的协议非常明确。明确的分工特别适合技术创新，所以互

电网分层分群（群集嵌套）体系结构图



>> 图表由作者提供

联网的智能化分布在整个网络的层次结构当中。

从互联网的发展经验来看，分层分群体系结构的电网具有与互联网一样的层次结构特点和运行范式，因而也会像互联网一样的智能。它特别适合未来电网发展，尤其体现在以下六个方面：

一是可以更好地利用多变的可再生能源，当可再生能源由当地利益相关者运营时，他们对资源的预测、计划和控制有更好的了解。二是可为生产型消费者赋权。生产型消费者将受到机制的激励，积极安装和运行高效设备，例如光伏发电系统、电池储能系统、电动汽车充电系统以及信息和

通信系统等。三是与外围设备分担责任。在数字化时代，因为硬件变得越来越便宜，软件变得越来越智能，外围设备的智能化管理模式与电网运营商在管理其子电网方面相似。四是纳米电网、迷你电网和微电网的无缝集成。新范式的责任分担功能与当今的纳米电网、迷你电网和微电网的自治或半自治理念兼容，有助于它们的无缝集成。此外，允许群集的半自治运行能防止生产型消费者“逃离”电网。五是快速适应技术创新：分层分群的体系结构使整合创新技术变得容易。六是增强韧性和抵御不断增加的网络攻击。平衡区理念可把分布式电源的使用同来自电网的各种压力

解耦，并提供一种可以更具体地应用于提升分布式电源容量系统韧性（且不降低配电的可靠性）的结构。在该结构下，大电网的运行部门不要求配电层次上任何详细的可观性，同时还可避免安全事故扩大化和网络安全漏洞。

从虚拟电厂的发展来看，如果一个配电区域发电量大于用电量，它就可以向输电系统运营商输出正功率；满足平衡区定义条件的虚拟电厂，如果同时遵守相同的运行规范，就可以助力保障未来超复杂电网的可靠性。如此，随着虚拟电厂的发展，就会逐步形成一个个相对独立的功率平衡区，从而加速分层分群电网体系结构的形成。因此，一定要把电网分层分群体系结构中的功率平衡区作为虚拟电厂的范式。

同时应明确以下三点：首先，平衡区的运行规范是平衡区内自行实现净功率平衡与优化，各平衡区间围绕总体目标进行协调。其次，虚拟电厂需满足平衡区定义中的条件，且最好遵守相同的运行规范，以确保未来超复杂电网的可靠责任。最后，监管结构、电网行业结构（包括市场结构）和控制、协调结构应保持一致。配电层次的虚拟电厂聚合的全部分布式电源，只能由一个当地的配电系统运营商（DSO）管理，且每个分布式电源都由当地配电网和大容量电力系统之间的单一接口进行电气定义。■

（作者系中国工程院院士、天津大学教授；编辑整理：本刊记者赵卉寒）