

电力生态系统视角下的电网演变及电力系统聚合理论

贺兴¹, 艾芊¹, 余志文¹, 徐意婷¹, 章健²

(1. 上海交通大学电子信息与电气工程学院, 上海 200240; 2. 上海市电力公司市区供电公司, 上海 200080)

摘要: 为了满足新时代电网发展的客观需求, 提出一种综合生态学、行为学、组织学, 并引入大数据分析方法的聚合理论。聚合理论以一个全新的视角对电力系统的运行特征、演变规律和调度模型进行描述, 可辅助指导电网运行的行为规范、运营模式、调度方案的制定。通过充分利用海量数据资源和采用更为普适灵活的组织群体运行模式, 契合了电网海量数据资源和主体分布式、多元化、智能化的发展趋势, 保障并加速了现代电网的演变进程, 具有实用性、前瞻性和指导性。

关键词: 聚合理论; 演变; 生态学; 行为学; 组织学; 大数据

Power system evolution and aggregation theory under the view of power ecosystem

HE Xing¹, AI Qian¹, YU Zhi-wen¹, XU Yi-ting¹, ZHANG Jian²

(1. School of Electronic Information and Electrical Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China;

2. Urban Power Supply Company, SMEPC, Shanghai 200080, China)

Abstract: To meet the need of grid development in new generation, an aggregation theory integrating with Ecology, Behavioral Science, Organization Theory as well as big data analysis method is proposed. The aggregation theory describes the power system operation features, evolution law, and dispatch model from the new perspective of Ecology, which can guide the design of the behavior norm, operation mode, and dispatch scheme of power grid operation. It makes full use of massive data and adopts organization group operation mode which is more universal and more flexible, conforms to the development tendency characterized as power grid mass data sources, and being distributed, diversified, and intelligent, and guarantees and speeds up the evolution process and modern power grid, which is practical, prospective, and instructive.

Key words: aggregation theory; evolution; Ecology; Behavioral science; Organizational Theory; big data

中图分类号: TM77 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2014)22-0100-08

0 引言

以新能源(如核能、氢能等)、可再生能源(如水能、风能、太阳能、生物质能、地热能、潮汐能等)代替化石能源的新能源革命是当今世界的重要主题^[1-7]。而上述能源的利用绝大部分是通过电气化实现的^[8-14]。2000年, 美国工程院将以电网技术为代表的电气化评为20世纪人类所取得的最伟大的科学成就^[15]。而迎接能源革命的挑战, 加快能源结构转型, 发展新一代电网技术, 成为当前电力系统发展的主要任务。

国家电网公司指出, 新一代智能电网的建设应当遵循安全可靠、经济高效、清洁环保、透明开放、友好互动等客观要求^[16], 这就要求在电网稳定的大

前提下, 设置相关激励制度调动个体的能动性, 并制定相关的调度管理措施使个体积极与其余个体及电网互动, 提升整个系统的资源优化程度, 并以环保为一刚性约束。

发展新一代电网, 需对其特色、发展瓶颈及相应的解决方法进行研究。这不仅仅涉及电力系统、电力电子、信息通信与管理控制等相关专业, 更需要综合利用生态学、社会学、行为学、组织学、大数据等领域, 在多时空尺度上关注电气化历程的不同阶段尤其是阶段转换时的突破瓶颈和核心传承, 相关因素(源网荷个体; 电力系统; 外界环境)的行为、发展规律及推动作用, 抽象提取出电力系统演变的普适性规律。在此基础上, 建立电力系统演变模型, 提出相关理论即电力系统聚合理论^[17-18]。聚合是指两个或多个个体通过某种联系形成聚合体的过程, 而参与的个体也可以是聚合体, 即聚合可

以嵌套。聚合理论不仅解释了电力系统演变过程中的行为、现象, 并对未来电网的发展趋势进行了展望, 通过寻找制约瓶颈、确定关键性技术、提出解决方案等, 保障并加速了电网的演变进程。

本文以含一定规模的主动性分布式多元化个体的新一代电网为对象, 综合生态学、行为学、组织学的相关研究成果, 以大数据为分析手段, 形成聚合理论并分析理论的研究框架。如图 1 所示。

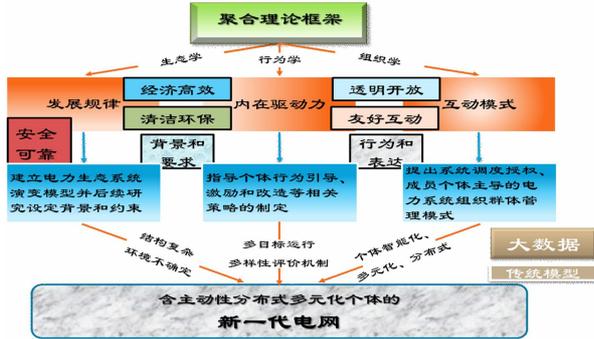


图 1 聚合理论及研究框架

Fig. 1 Aggregation theory and its research framework

以生态学的角度描述历届电网中个体单元的自身特征、相互依赖关系和电力系统的运行、管理模式, 抽象提取出普适性的电网发展规律, 建立电网演变模型。进一步, 根据行为学的现有理论和相关成果建立个体的行为—激励模型, 描述个体发展的内在驱动力, 可指导个体单元的行为引导、激励、改造等相关策略的制定; 从组织学的角度研究个体的行为表达方式及载体, 描述个体间及个体与系统的互动模式, 提出了由成员主导、领导授权的电力系统新运行模式——组织群体管理模式; 并利用大数据相关方法将其应用于电力系统中。

1 电力生态系统及演变历程

该部分建立了电力生态系统(PEcoS)演变模型。具体研究了电网中个体(individual)、组织(organization: team & group)、智能电网乃至包括环境的广义电力系统的实体宏观特性、依赖关系和相互作用等, 探讨实体的生存、发展模式 and 实体间的信息流、能量流和物质流以及系统的和谐稳定。该部分的研究设定问题研究的基础框架, 明确个体和系统的宏观特性, 引出当前电网发展的主要问题, 提供了后续研究的问题背景和环境约束。

1.1 电力生态系统 PEcoS

首先, 建立电力系统(Power System)与生态系统(Ecosystem)间的映射关系, 如表 1 所示。

表 1 电力系统与生态系统的映射

Table 1 Mapping relationship between PS and Eco

生物 Organism	有生命的个体
个体单元 Individual unit	当前层面下可调度、控制的具备行为特性的单元, 强调当前层面
种群 Population	一个区域内享有同一基因库的生物集合
团队 Team	拥有同一明确目标的个体单元组织, 成员以团队目标为行为动机, 联系紧密。成员类型、结构、职能奖励分配相对固定
群落 Community	生存在一起并与一定的生存条件相适应的动植物总体, 其生活空间为群落生境
群体 Group	同一个生境下相互影响的个体/团队总体, 成员以各自目标为行动动机, 可存在较大的异质性, 仅遵循基本群体规范。群体的边界和约束较为宽松

在此基础上, 定义电力生态系统(PEcoS), 电力生态系统是指在一定的空间内, 电气元素(产—源、消—荷、传—网)和环境元素(人类、天气环境等)构成的统一整体, 在这个统一整体中, 电气元素与环境元素之间通过信息流和能量流进行互动。电力生态系统与生态系统一样, 也需要维持和谐稳定, 在电网中: 发电量=用电量+损耗; 对整个系统: 输入能量=输出能量+损耗能量。但不同的是, 电力生态系统平衡的维持不仅仅是依靠系统环境及内部电力单元个体的自身调节能力, 也依靠调度人员的干涉, 这意味着在电力生态系统中, 个体形态、行为不仅仅是被动的、自发的, 也可在调度人员的干涉下有规划、有目的进行。与系统基于自然调节的特性研究一样, 系统的可控性研究也是必要的。

1.2 PEcoS 视角下的三代电网演变

由上述分析可得, 和生态系统一样, 电力生态系统也是不断进化的, 其各个时期的构成因素和整体形态如图 2 所示。

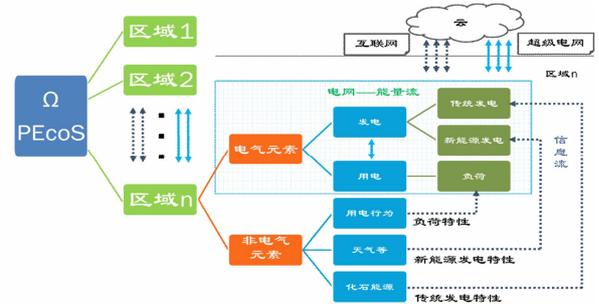


图 2 三代电力生态系统结构

Fig. 2 System structure of different generations of power system

(1) 第一代电网——小型电网

类似于早期的生物最初阶段, 第一代电网中电力个体单元以生存为目的, 将大环境视为外生变量(exogenous observable), 个体单元几乎无优化、改造大环境的能力, 而个体的生存环境很大程度上受

大环境的影响，故个体无法积极与环境互动以主动利用环境，仅被动地适应生存环境，系统运行特点和调度策略具有当地特色。

(2) 第二代电网——互联电网

从生态系统的角度看，第二代电力系统仅需在全 PEcoS 实现能量平衡而并非在互联的每个区域内，这实现了广域资源优化和优势资源利用；系统控制体系以领导层/环境为主导，以团队为控制单位进行自上而下的调控，以集中调度或集散调度为主要方式：系统调度以 PEcoS 和谐稳定为前提，兼顾区域的需求和特点，下达调度指令；各区域被动地对指令进行响应，工作模式类似于团队，区域中个体以所属团队的调度指令为统一目标，根据经典模型和经验惯例等，在区域控制中心管理下进行工作、产生绩效、获取报酬。

(3) 第三代电网——智能电网

面向区域的自上而下团队式电力系统已经成熟，而新技术、新理论的发展以及能源转型的需求则对电力系统的演变提供了新的动力和方向。

目前，各个国家、地域普遍在第二代电网到第三代电网的过渡时期，根据各自资源的不同，发展的方向也不尽相同，但信息流和能量流的区域性突破和可再生能源的消纳及电能的多渠道利用是其基本的共性。第三代电网的发展刚刚起步，电源侧可再生能源转化和利用技术已经成熟，但进入电网的配套制度不够完善、迟滞脱节，标准也尚未完善，往往导致投资失调，弃风、弃光，发挥不到预期的效果，是电网的可再生能源和第三代电网演变的主要制约。在风力资源和发电设备都良好的黑龙江平原风电场，其风电场全年等效满负荷小时数也仅为 2 000 多小时，弃风限电、电网检修计划等风电场与电网不和谐运行极大地影响了真正产生效益的风机并网小时数^[19-20]。而调度管理则是在资源结构和比例协调的情况下，资源的优化配置和优势资源的优先利用，即规划合理的第三代电网的运行规律和管理模式是本文的重点研究内容。

(4) 三代电网对比及电网调度管理分析
其三代电网的对比如表 2 所示。

表 2 第一代、第二代和第三代电网比较
Table 2 Comparison between different generations of power system

项目	第一代电网	第二代电网	第三代电网
源端	利用资源	火力、水力	火力、水力、核能
	发电模式	小机组	大机组
系统网络	输电电压和方式	220 kV↓	330 kV↑超高压交流、直流输电，架空线路
	规模、结构	城市电网，孤立的 小型电网	区域电网为模块，主干网相联的大型 电网
	能量和信息交互	孤立电网间无交互	以区域的接口和联络线进行交互
荷端	用户类型	照明	电机，精密仪器
	用电方式	被动用电	被动用电，计划用电
	引导措施	无，仅测量	需求侧分析：负荷现状、预测，较成熟；需求侧响应：电价引导，效果低
管理调度	调控对象	发电机组	源端机组、网络结构， 荷端一般不参与
	对象响应	被动响应	接受调度指令并依此运行， 呈团队特性
	调控方式	按需用电，调控 机组	计划用电，调控网络结构，调控机组
	调控目标	发电用电平衡	保持节点电压、频率稳定，控制电网潮流，确保电能可靠、优质、经济
	管理模式	粗放式经营管理， 呈明显的地区特性	发、输、配垂直管理，后期引入电力市场，分层分区调度，团队模式工作

文献[21]提出的三代电网演化仿真结果,如图3所示,也与本文的描述是一致的。

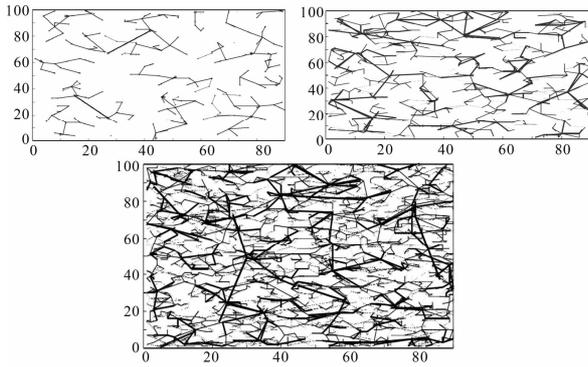


图3 三代电网生长演化仿真结果

Fig. 3 Simulation result of three generations of grid's evolution

由以上分析和图3可知,第二代电网是历代电网中最能体现网络结构的一代电网,该阶段也是电网发展的过渡阶段,在粗犷管理的基础上,开始大范围的资源优化,而第三代电网则脉络并不清晰,其末支与主干均比较发达,末支部分的加强使其也具备了承担系统调节的能力,有管理电网的潜力。而在管理调度方面,第二代电网以团队运行模式为主,可调度元素较少,对象也是较为好控的水力、火力、核能等资源,源网荷结构清晰、分工明确,且多为同一隶属的或可统一调度的,评价机制也较简单,这就促使了运行调度模型、团队管理模式和各种规范较易形成。而在资源配置相对完整的第三代电网中,信息流和能量流的发展极大地削弱了区域的限制,个体智能化、多元化、分布式,系统和环境复杂性、不确定性和主观评价标准、体系的多样性等特点使得系统运行特性模型和管理调度模型单从电力系统的角度难以建立。而以数据本身反应特性的大数据理论和行为学、组织学将会是未来电力系统的研究基本手段和制约其发展的调度管理因素的重要突破点。

依据情境领导理论,如图4所示,采用授权式将是第三代电网较为合理的管理主要方式。该模式是由上级授权和约束,个体/组织主导的一种组织群体工作模式,契合第三代电网的特点:上级常规状态仅观察、校正,时而需要进行更高层面的系统整体宏观把握和战略部署即中、短期规划,仅与个体进行少量的授权信息交互,提供相对宽松的个体运行环境,相对也减小了调度成本和复杂性;个体则以追求自己的目标为主要行为动力,体现个体的异质性,同时也可直接或通过上级间接交互,发挥个体的同质性。

对此,我们在个体/组织领域开展以下研究:1)个体在系统中的行为研究——行为模型和激励策略;2)个体行为的表达形式研究——组织群体管理模式^[22]。

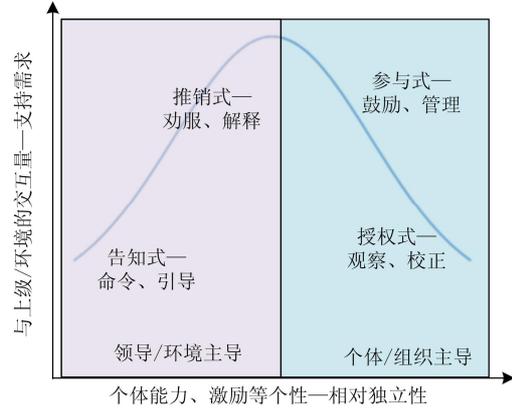


图4 情境领导理论

Fig. 4 Situational leadership theory

2 个体行为学、组织学研究

行为学——研究建立个体的行为—激励模型,揭示了个体发展的内在驱动力,指导个体行为引导、激励和改造等相关策略的制定。研究内容:研究电网中实体的特性需求、动机形成、行为模式、行为绩效和报酬奖励等行为环节的内容和相互影响,通过需求理论、过程理论和强化理论分析研究行为—激励的关系。研究意义:解决实体行为规律的相关问题“实体该以什么样的状态运行及相应的诱导、控制措施”,从引导政策、上网规范、调度措施、奖惩设计等方面提出可行的实体行为规范和激励模式,提升电力系统运行安全性、经济性、灵活性等指标。

组织学——研究个体的行为表达方式,研究了个体间及个体与系统的互动模式,提出了系统调度授权、成员个体主导的电力系统组织的群体管理模式。研究内容:研究个体绩效载体、特性及演变,即个体通过聚合形成组织绩效载体(聚合体)及其发展过程;研究群体管理模式下的工作、奖励分配;研究聚合的辅助措施及相应的支撑系统框架。研究意义:对 PEcoS 和行为学的成果进行补充,解释了三代电网小型电网→互联电网→智能电网和可再生能源利用载体 DG→微网→微网群→VPP→超级电网的演变,明确了聚合的优势、目标、环境前提、条件需求和所带来的新问题,并预测未来电网的运行方式及管理架构。

2.1 个体行为—激励策略研究

激励(Motivation)是引导人们做出特定行为而不是另一些行为的力量的组合。行为—激励模型大体可分为以下方面：需求理论、过程理论和行为改造的强化理论。需求理论指出，个体在环境中生存、发展都是有需求(Desire)的，需求是激励理论的起点，也是动力的源泉。需求可以是多样的，正是需求，决定了价值(Goal)，产生了动机(Motivation)，引导着行为(Act)；而过程理论则研究需求作用于行为的过程，与需求理论共同构成行为—激励模型的核心。过程理论由期望理论(expectancy theory)和比较理论(Comparison theory)构成：期望理论指个体需求结合对自身和外界环境及组织的认识、评估，个体将会产生一定的目标期望(Exp)。该目标期望将依据期望理论转化为一系列符合价值和环境约束的绩效(Performance)和个体行为。即想要得到奖励(Rewards)，所以要为组织创造绩效，进而该采取一

定的行为和方式，即付出(Pay)。这些形成了个体的动机的初衷(Intention)、方向(Direction)、强度(Strength)、持续性(Persistence)，指导了个体工作的行为。而比较理论则是该过程中个体将该过程中的输入、输出和他人、自己过去及理想状态进行主观的比较。通过预想和对比，个体将会对整个行为—激励过程进行主观评价，将导致：1)产生满足的情感(效价)，对今后的工作动机产生一定的影响；2)对工作、绩效、报酬整个客观过程进行归纳总结(归因)，在此基础上，重新认识自我和外界；行为改造理论则认为行为是结果的函数。针对上述的过程，通过改变奖励或制定措施的方法调整策略：通过选择积极强化、避免、惩罚、停止等强化类型，对个体进行连续或间断的强化，以对个体进行组织行为校正(Organization Behavior modification, OB Mod)对上述行为—激励理论进行概括，建立其行为—激励模型，如图5所示。

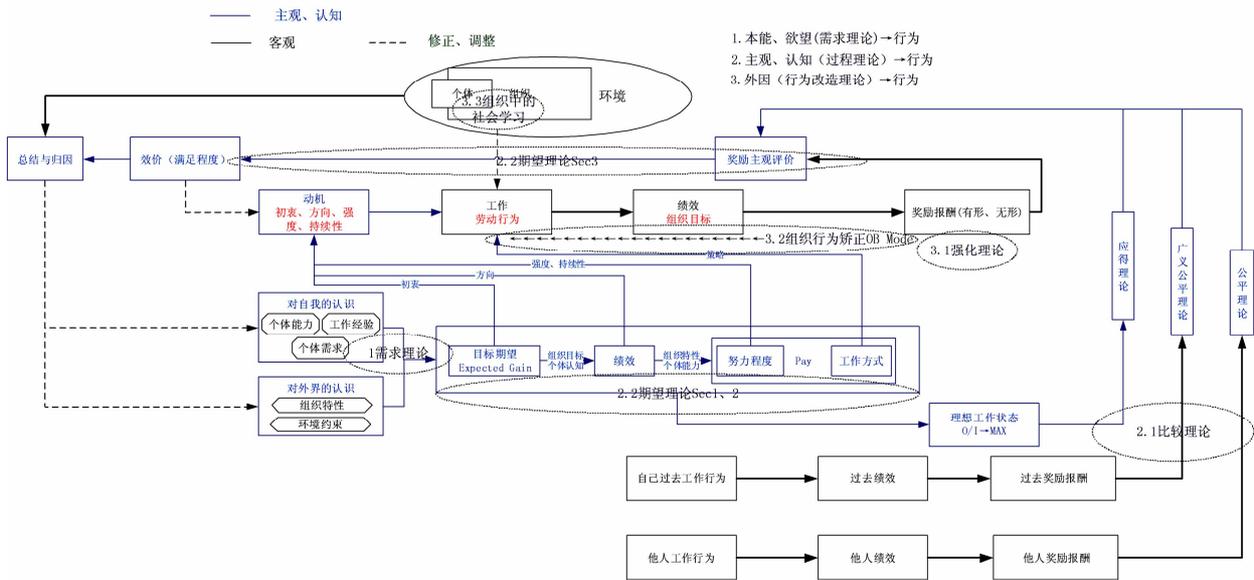


图5 行为—激励模型
Fig. 5 Act-motivation model

2.2 个体行为表达形式研究

群体由两个或两个以上个体构成，他们之间存在互动关系，影响对方也受对方影响。群体可由数个团队构成时，各团队在群体大环境背景下以及遵守基本规范的前提下追求各自的目标。此时，群体行为主要是强调团队在追求各自目标的过程中合作、协调等互动行为，个体职能、奖励等以群体→团队→个体二次分配的形式确定，与团队模式基本一致。与团队不同的是，群体中的个体也可具有异质性，群体可由追求不同目标的多元化个体构成，

个体行为以各自利益为出发点，仅需遵循最基本的群体规范，个体不满意时可以相对轻松地脱离组织。由上分析所得，群体的工作方式、成员结构、职能奖励分配相对自由灵活。电力系统中的群体如：跨数个区域的虚拟电厂 VPP，含数个运行方式灵活的微电网的配网示范区等。而在群体管理模式中，影响群体的绩效因素如下。

(a) 群体构成(group composition)

一般指群体成员的同质性和异质性。同质性群体中成员特性趋于一致，沟通成本低、具备相对较

高的内聚力,但容易形成群体极化(group polarization)或群体思维(groupthink),所做出的决策经过不断的同化往往是群体一致的结论而并非最优的结论;针对群体成员同质点的打击可能使群体特性巨变,如全由风机组成的发电群体当风停时其出力将会较大波动,群体系统鲁棒性较低;同质性群体面临有限资源时成员间易形成竞争关系而降低成员的工作效率。而异质性群体相反,冲突多、意见不一、不易齐心协力,沟通成本高、时间长,但异质群体的思维发散,灵活性较高,且在工作中会形成辅助、互补等关系使得成员的工作效率得到极大的提升。

(b) 群体规模(group size)

规模大的群体拥有更多的资源,随着群体规模的增加,生产力和新思想的增长率呈递减的趋势,互动和沟通的复杂度的增长率呈递增趋势。群体复杂性问题与公平性问题也会随着群体规模的增长而显现出来,规模较大的群体工作难以组织协调,成员间也容易职能冲突或竞争压制;难以制定工作分配和奖励分配制度,成员的责任感、公平感需求难以满足。最终会导致群体较大的社会性虚度(social loafing),即成员在群体中工作时不努力或努力程度远低于独立工作。

(c) 群体规范(group norm)

一般形成于沟通和决策阶段而随后随着群体的成长而不断改进,规范由群体人格特征、情境、任务和群体历史共同决定。规范确保了可为群体所接受的行为,体现了群体的核心价值观,令群体区别于其他群体;同时,对群体成员,规范确保了其行为的一致性,同时提供预测行为的基础。

(d) 群体内聚(group cohesiveness)

群体保持集合的承诺程度,来自促使群体成员留在群体的各项因素。包括群体吸引力、抵抗脱离群体的力量以及保持群体成员身份的激励。

群体内聚力和组织生产并非直接关联,当群体目标和组织目标一致性较高时,群体的组织生产才较高;反之,群体更可能因为个人私利或群体极化、群体思维等而努力实现群体的目标而放弃了组织的利益。

2.3 基于大数据的电力系统行为、组织学应用

如图1所示,第三代电网中个体智能化、多元化、分布式,个体异质性和主观能动性较强;系统结构复杂,风、光等环境不确定性也将引入系统;而评价机制和体系也呈多样化,碳排、环保、高效

等也成为系统运行的刚性或柔性指标。传统模型通过建立强因果关系推导,往往仅在特点约束或特定目标时成立,而大数据则通过数据本身说明问题,可以证明当数据足够大时,其随机矩阵的本征值必然是收敛的且所含信息是完备的^[23]。而长时间、跨空间的数据采样和收集,在当今电网发展中并非强制约因素。因此,采用大数据技术,结合相关已有的电力系统模型对电力系统进行认知和分析,将可大幅度提升系统认知和分析能力,一定程度上解决了第三代电力系统难以建模、分析的问题;而对个体而言,通过信息交互、共享等将从自我系统认知提升到生态系统认知而可作出更为有利的决策。

2.4 综合案例

能源危机和环境问题给可再生资源(RES)利用相关技术的发展提供了动机。而RES以DG等形式并网,在电力系统中运行需要满足电网稳定的刚性约束;同时,有利于系统稳定的工作行为将产生绩效,可予以远超市场电价的奖励。这就促成了DG、储能、电能治理等系统运行相关设备和调度措施的结合:如DG辅以具有快速功率调节能力的小规模储能单元进行秒级出力平滑;而对多个DG或某个片区,采用燃气轮机或水电站进行局域功率调整。在此过程中,微网或微网集群的相关的概念、运行约束、调度方法渐渐形成并走向成熟。而随着信息流和能量流的发展,各微网之间又可进行交互行为,实现广域的资源优化,即虚拟电厂VPP。结合传统电网和大型可再生能源发电,即构成了超级电网Supergrid。而在VPP和Supergrid中,个体彼此间地理、物理约束较小,运行较为灵活,此时,个体主导的授权式群体管理模式将能更好地实现个体的利益和发挥潜力,具有一定的优越性。而从长远看,迫于日益严峻的能源问题和环境压力,PEcoS产生了可持续无污染发电的需求,则各国必然将通过一系列的政策法规及对分布式多源不确定发电系统相关技术的研发,引导以可再生清洁能源为主的能源结构转型。而该过程中,核电、大型风机等政策推行和项目落地的可行性时要考虑民众的意见。则应通过国家历年来的政策、规划,电力系统相关制度、规范及项目、用户、群众的调研等收集数据。以上所做的分析、研究均涉及庞大的数据和较为复杂的逻辑,大数据与传统模型结合将是很好的研究手段。

3 结论

针对新一代电网特色,发展时会遇到的瓶颈,

如何解决等问题, 本文提出了聚合理论及研究框架。聚合理论采用大数据与常规模型结合为手段, 结合生态学、行为学、组织学, 对电力系统进行多时空尺度的研究, 以生态学发现问题和设定问题背景, 以行为学对问题现象进行深入剖析并提出解决措施, 以组织学研究解决问题的手段, 最终形成聚合理论。聚合理论不仅可以解释电力系统演变过程中的行为、现象, 并对新一代电网的发展趋势进行展望和指导, 保障并加速了电网的演变进程, 具有重要的意义。

参考文献

- [1] 陈树勇, 宋书芳, 李兰欣, 等. 智能电网技术综述[J]. 电网技术, 2009, 33(8): 1-7.
CHEN Shu-yong, SONG Shu-fang, LI Lan-xin, et al. Survey on smart grid technology[J]. Power System Technology, 2009, 33(8): 1-7.
- [2] Secretary of State for Trade and Industry, UK. Our energy future: creating a low carbon economy[R]. United Kingdom: British Government, 2003: 25-29.
- [3] 胡学浩. 智能电网: 未来电网的发展态势[J]. 电网技术, 2009, 33(14): 1-5.
HU Xue-hao. Smart grid: a development trend of future power grid[J]. Power System Technology, 2009, 33(14): 1-5.
- [4] TAI H, HOGAIN E O. Behind the buzz, eight smart-grid trends shaping the industry[J]. IEEE Power & Energy, 2009, 7(2): 96-97.
- [5] 余贻鑫, 栾文鹏. 智能电网述评[J]. 中国电机工程学报, 2009, 29(34): 1-8.
YU Yi-xin, LUAN Wen-peng. Smart grid and its implementations[J]. Proceedings of the CSEE, 2009, 29(34): 1-8.
- [6] IPAKCHI A, ALBUYEH F. Grid of the future[J]. IEEE Power & Energy Magazine, 2009, 7(2): 52-62.
- [7] 王明俊. 智能电网与智能能源网[J]. 电网技术, 2010, 34(10): 1-5.
WANG Ming-jun. Smart grid and smart energy resource grid[J]. Power System Technology, 2010, 34(10): 1-5.
- [8] 周孝信, 陈树勇, 鲁宗相. 电网和电网技术发展的回顾与展望——试论三代电网[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(22): 1-11.
ZHOU Xiao-xin, CHEN Shu-yong, LU Zong-xiang. Review and prospect for power system development and related technologies: a concept of three-generation power systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(22): 1-11.
- [9] CONSTABLE G, SOMERVILLE B. A century of innovation: twenty engineering achievements that transformed our lives[M]. Washington, DC: The National Academies Press, 2003: 1-12.
- [10] 薛媛, 陈哲照, 王涛, 等. 新能源发电并网系统的控制策略[J]. 电力系统保护与控制, 2008, 36(13): 11-14.
XUE Yuan, CHEN Zhe-zhao, WANG Tao, et al. Control strategy of grid-connected power generation system on renewable energy[J]. Power System Protection and Control, 2008, 36(13): 11-14.
- [11] 杨德州, 王利平, 张军, 等. 大型分布式电源模型化研究及其并网特性分析 —— (一)光伏电站专题[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(18): 104-110.
YANG De-zhou, WANG Li-ping, ZHANG Jun, et al. Modelling of the large-scale distributed power supply and the analysis of corresponding grid-connected characteristics — (1) photovoltaic plant thematic[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(18): 104-110.
- [12] 董永平, 何世恩, 刘峻, 等. 低碳电力视角下的风电消纳问题[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(5): 12-16.
DONG Yong-ping, HE Shi-en, LIU Jun, et al. Wind power consumption problem in the view of low carbon power[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(5): 12-16.
- [13] 陈昌松, 段善旭, 殷进军, 等. 基于发电预测的分布式发电能量管理系统[J]. 电工技术学报, 2010, 25(3): 150-156.
CHEN Chang-song, DUAN Shan-xu, YIN Jin-jun, et al. Energy management system of distributed generation based on power forecasting[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2010, 25(3): 150-156.
- [14] 娄素华, 王志磊, 吴耀武, 等. 基于机会约束规划的含大规模风电电力系统协调经济调度(英文)[J]. 电工技术学报, 2013, 28(10): 337-345.
LOU Su-hua, WANG Zhi-lei, WU Yao-wu, et al. Coordinated economic dispatch for power system with significant wind power generation based on chance-constrained programming[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2013, 28(10): 337-345.
- [15] 胡兆光, 谭显东, 许召元, 等. 2050 中国经济发展与电力需求探索: 基于电力供需研究实验室模拟实验[M]. 北京: 中国电力出版社, 2011: 3-4.
HU Zhao-guang, TAN Xian-dong, XU Shao-yuan, et al.

- Enquiry for China's economic development and electricity demand till 2050: simulation supported by intelligent laboratory for economy-energy-electricity-environment[M]. Beijing: China Electric Power Press, 2011: 3-4.
- [16] 刘振亚. 智能电网知识读本[M]. 北京: 中国电力出版社, 2010.
- LIU Zhen-ya. Smart grid knowledge reader[M]. Beijing: China Electric Power Press, 2010.
- [17] 艾芊, 贺兴, 余志文. 电力系统聚合理论概念及研究框架[J]. 低压电器, 2014, 34(10): 50-55.
- AI Qian, HE Xing, YU Zhi-wen. Concept and research framework of aggregation theory for power system[J]. Low Voltage Apparatus, 2014, 34(10): 50-55.
- [18] HE X, AI Q, YUAN P, et al. The research on coordinated operation and cluster management for multi-microgrids [C] // Proc of Sustainable Power Generation and Supply, Hangzhou, Aug, 2012: 1-3.
- [19] 高阳. 风电场发电量的分析[J]. 科技信息, 2014(3): 220-223.
- GAO Yang. Analysis of the wind farm power output[J]. Science & Technology Information, 2014(3): 220-223.
- [20] 徐伟. 黑龙江西部平原风电场等效满负荷小时数与单位千瓦扫风面积的关系[J]. 科技创业家, 2013(22): 146-147.
- [21] 梅生伟, 龚媛, 刘锋. 三代电网演化模型及特性分析[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(7): 1003-1012.
- MEI Sheng-wei, GONG Yuan, LIU Feng. The evolution model of three-generation power systems and characteristic analysis[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(7): 1003-1012.
- [22] 里基·W·格里芬, 格里高利·莫海德. 组织行为学[M]. 8版. 北京: 中国市场出版社, 2008.
- [23] QIU R, WICKS M. Cognitive networked sensing and big data[M]. Springer, 2013.
-
- 收稿日期: 2014-06-19; 修回日期: 2014-07-25
- 作者简介:
- 贺兴(1986-), 男, 通信作者, 博士研究生, 主要研究方向为电力系统自动化技术、微电网及保护; E-mail: hexing_hx@126.com
- 艾芊(1969-), 男, 博士, 教授, 主要研究方向为电能质量、人工智能在电力系统中的应用、电力系统元件建模、微电网;
- 余志文(1987-), 男, 博士研究生, 主要研究方向为人工智能在电力系统中的应用、大数据。