

区域能源互联网多能系统规划决策关键技术及应用

张利军¹, 徐晨博¹, 范娟娟², 袁翔¹, 徐汶³, 庄峥宇¹

(1. 国网浙江省电力公司经济技术研究院, 浙江杭州 310008; 2. 浙江华云信息科技有限公司, 浙江杭州 310008;
3. 浙江华云电力工程设计咨询有限公司, 浙江杭州 310008)

Critical Technology and Its Application of Multi-energy System Planning and Decision-making for Regional Energy Internet

ZHANG Lijun¹, XU Chenbo¹, FAN Juanjuan², YUAN Xiang¹, XU Wen³, ZHUANG Zhengyu¹

(1. State Grid Zhejiang Economic Research Institute, Hangzhou 310008, China;
2. Zhejiang Huayun Information Technology Co., Ltd, Hangzhou 310008, China;
3. Zhejiang Huayun Engineering Design and Consulting Co., Ltd, Hangzhou 310008, China)

摘 要: 本文在剖析能源互联网发展新趋势基础上, 深入分析区域能源互联网多能系统的发展挑战并对多能系统的规划决策技术开展深入研究, 针对多能系统中多能量规划、响应建模、系统多能节点调度分析与系统运行发展评价等现实需求设计了求解办法。同时, 构建了基于“大云物移”新技术的信息通信支撑体系, 实现多能系统的信息互通与共享。并以浙江能源互联网实际需求为基础, 对能源互联网多能系统规划决策关键技术进行了案例验证, 以此为基础搭建了能源互联网多能系统综合能源管理系统架构, 包括业务架构、数据架构、技术架构与系统布置等, 为能源互联网多能协同规划、优化控制与科学评价的系统实现提供了参考。

关键词: 能源互联网; 多能耦合; 规划决策; 综合能源管理

Abstract: Based on developing trends of the energy internet, the developing challenge of multi-energy system for regional energy internet is deeply analyzed, and corresponding planning and decision-making are studied. In addition, solving methods for such real requirements as energy planning for multi-energy system, response modeling, dispatch analysis of multi-energy bus and system operation development are designed. Furthermore, information and communication support system is built based on “Big Data-Cloud Computing-Internet of Things-Mobile Internet” new technique to achieve the information sharing for multi-energy system. On the basis of real requirement of Zhejiang energy internet, critical technique of multi-energy system planning and decision-making for energy internet are verified through cases study, which include business structure, data structure,

technique framework and system allocation, etc. This work provides reference for system realization of multi-energy coordinated planning, optimized control and scientific evaluation for energy internet.

Keywords: energy internet; multi-energy coupling; planning and decision-making; integrated energy management

0 引 言

在能源互联网研究创新热潮中, 能源互联网的概念、内涵、框架体系与关键技术等迅速成为社会各界关注的焦点, 美国、德国、丹麦、日本及我国均从各方面开展了相关研究。国内外相关各类研究与实践中, 以多能耦合为代表的多能系统是能源互联网的重要组成^[1-5], 电能、燃气、热能等各类能源的广域协调与优化控制是提高能源利用效率、优化用能方式、降低用能成本的关键举措, 因此, 针对多能耦合的分析研究占有重要地位。瑞士联邦理工学院提出了可表征不同能源设施与负荷的接口的能源集线器^[6]概念, Krause^[7]基于这一概念进一步进行了建模分析。德国“E-Energy”计划中的Moma项目和RegModHarz项目^[8]分别对多种能源融合构建泛能网络与实现多种用能终端的智能互联开展了探索, 主要采用集中式的能量管理架构。此外, 加拿大、英国和我国也在这一领域进行了卓有成效的研究, 涵盖多能耦合机理、多能优化调度等。

但在实际能源互联网多能系统构建过程中, 对

基金项目: 国网浙江省电力公司科技项目(5211JY15001S)

于多能耦合不同网络中响应特性差异性分析、多能系统智能规划等分析技术仍有待完善，结合现有能源企业信息系统构建多能管理系统还需进一步探索。本文在考虑区域能源互联网多能系统对多能耦合功能需求的基础上，针对其规划决策关键技术开展研究与应用，并基于现有电网企业信息系统架构探索构建具有较强实操性的多能系统能源管理系统。

1 区域能源互联网

1.1 概念内涵

区域能源互联网是指在具有一定相似性或者特定地域范围的区域中，依托灵活有效的规划决策技术，基于先进信息通信技术，将电、气、热等能源网络中生产、传输、存储、消费等环节有机互联，实现能源协同耦合、统筹优化配置的多能源协调运行体系。

在其发展期，将长期呈现以电为核心，电、气、热等多种能源网络间耦合互联，多种能源形式间协调互补的发展格局，如图1所示。随着电网与热网、气网的耦合逐步紧密，考虑到电能品位高、质量好、传输距离远、损耗小的特性以及电网规模大、自动化智能化程度高的优势，电网势必成为多能系统优化互补的桥梁与核心。

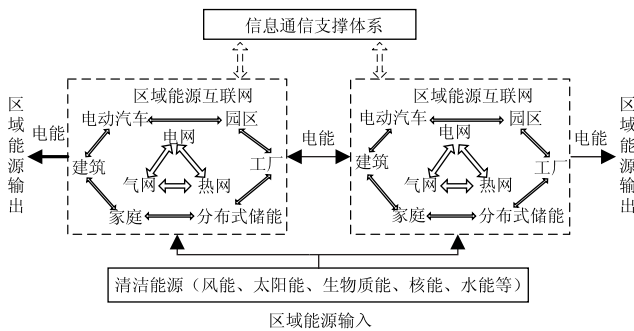


图1 区域能源互联网多能系统协调互补

Fig. 1 The multi-energy coupling of regional energy internet

1.2 区域能源互联网多能系统所面临的挑战

相比传统电网、热网、气网独立发展独立运行的模式，区域能源互联网发展期多能系统的能源耦合模式将相对单一化的独立能源输配用网络拓宽升级为多元智能能源配置网络，能量流与信息流融合度不断提高，并面临以下挑战：

1.2.1 上下游随机问题

随着能源互联网的发展，用户与电网、能源互联网的双向互动程度将大幅提高，分布式发电、储

能大规模并网，冷热电三联供等能源耦合节点不断增加，能源生产与消费的界限日趋模糊，能源生产消费上下游的高随机性容易引发供需双侧的不匹配，影响多能系统的稳定运行。

1.2.2 内部耦合边界不确定性

多能系统难以用统一的方法描绘不同能源系统边界的能量流向，单一能源系统内事件或扰动对于多能系统的影响程度需要准确刻画。多能系统的能量管理将不再是简单的能量调度分配，而是必须在实现与需求侧互动响应的基础上，综合考量各节点的能量输出能力、各能量通道负载能力与节点的可调度潜力，统筹分析实现能量的优化调度分配。

1.2.3 多能系统运行优化与评价问题

多能系统中各环节相对独立但高度关联，各类扰动与系统间的交互影响更加复杂，各节点单元间协调配置难度加大。需要合理评估各类能源生产节点(重点是新能源发电节点)的互补协调能力分析，加深气网、热网与电网的融合，通过多能互补协同弥补系统随机性带来的系统可控性降低。同时，对于多能系统的运行与演化，需要建立系统化的指标评价体系，对系统运行质量进行实时监控并为系统演化完善提供数据支撑。

因此，研究完善以系统合理规划、科学优化为目标的区域能源互联网多能系统规划决策关键技术及其管理系统对于推进多能互补、推动能源互联网发展具有重要的应用价值。

2 区域能源互联网多能系统规划决策关键技术

前述区域能源互联网多能系统所面临的三大挑战，实质上是未来多能系统在规划、运行和评价方面迫切需要解决的问题。相对应地，本文提出计及多能不确定性的系统能量规划分析技术、需求侧激励响应建模分析与可调度潜力预测、区域多能耦合系统评估评价指标体系

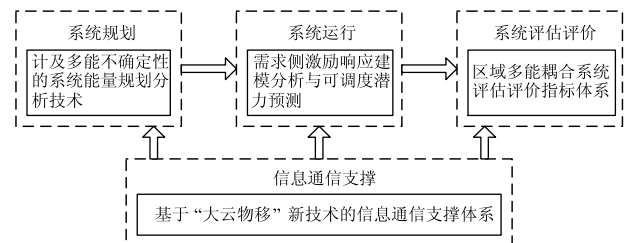


图2 关键技术逻辑框架

Fig. 2 The logic structure of the key technologies

励响应建模与可调度潜力预测、多能系统评估评价体系，分别为多能系统的科学规划、精准运行与合理评估提供可行方案。同时，考虑到先进信息通信技术是未来能源系统实现智慧化的基础，是破解区域多能互联面临挑战的重要支撑，本文尝试建立以“大云物移”（大数据、云计算、物联网、移动应用）技术为核心的信息通信支撑体系。

2.1 计及多能不确定性的系统能量规划分析技术

可再生能源发电的间歇性与气网、热网的随机性相叠加，给传统基于日前规划与实时校正的调度管理模式带来了挑战，可借助机会约束规划模型^[9]处理多能协同规划问题。对于以多能系统能量利用最大化为目标的规划问题，在保证系统稳定运行的概率大于一定的置信度水平下，实现多种能源的复合最大化利用，其机会约束规划模型如下：

$$\max e_c^T P_c + e_g^T P_g + e_h^T P_h \quad (1)$$

$$\text{s. t. } \begin{cases} \Pr\{P_{lc}(v, s, P_{wind}, P_{solar}, P_{me}, P_{de} \dots) \leq P_{lmax}\} \geq \alpha_c \\ \Pr\{P_{lg}(P_{mg}, P_{dg}) \leq P_{lgmax}\} \geq \alpha_g \\ \Pr\{P_{lh}(P_{mh}, P_{dh}) \leq P_{lhmax}\} \geq \alpha_h \end{cases} \quad (2)$$

$$\Pr\{c_{gen}^T (P_{genmax} - P_{gen}) \geq P_{re}\} \geq \beta \quad (3)$$

$$P_{genmin} \leq P_{generator} \leq P_{genmax} \quad (4)$$

$$e_c^T P_c + e_g^T P_g + e_h^T P_h + e_d^T P_d = e_{dc}^T P_{dc} + e_{dg}^T P_{dg} + e_{dh}^T P_{dh} \quad (5)$$

目标函数(1)表示多能系统中所有能源生产节点的能源输出总和，其中 P_c 、 P_g 与 P_h 分别表示为电网中各可再生能源装机容量、气网和热网各节点能量产出值的向量。概率不等式约束(2)表示电网、气网和热网的支路过负荷机会约束。以电网为例，其中 P_{lc} 为输配电线路有功功率向量；其为风速向量 v ；光照强度向量 s ；风电装机容量 P_{wind} ；光伏发电装机容量 P_{solar} ；常规发电机组有功功率向量 P_{me} 和负荷向量 P_{de} 的函数； α 为事先给定的置信度水平。不等式约束(3)表示关于系统备用的机会约束，其中 P_{genmax} 为系统电网常规机组以及热网、气网和储能系统中能量出力最大值向量； P_{re} 表示系统要求的备用容量，包括电网中的旋转备用以及储能系统容量等； β 为系统备用的置信水平。不等式约束(4)表示多能网络中机组出力值约束。 P_{genmin} 和 P_{genmax} 为考虑多能耦合的各类机组最小和最大出力。等式约束(5)为系统能量流平衡方程。

进一步，考虑风电、光伏发电随机性强，因

此，采用概率分布鲁棒机会约束^[10]来求解电网在可再生能源发电功率处于极端概率分布情况下，系统线路不过负荷的概率要求。优化模型目标函数为式(6)，其目标为多能系统扩建改建费用最经济。其中， n_{ij} 为节点 $i-j$ 之间可扩建(改建)的能源传输线路数目， Ω 为可规划的线路集， c_{ij} 为节点 $i-j$ 间线路改、扩建费用， α_ϵ 为线路过负荷惩罚因子， ϵ_{ij} 定义为支路 $i-j$ 的过负荷程度：

$$\min_n \left(\sum_{(i,j) \in \Omega} c_{ij} n_{ij} + \alpha_\epsilon \sum_{(i,j) \in \Omega} \epsilon_{ij} \right) \quad (6)$$

该目标函数的约束主要为系统能量潮流的平衡、系统出力约束与概率分布鲁棒机会约束，其核心是在所有可再生能源发电功率概率分布情况下，多能系统各条线路不过负荷的概率都要大于给定置信度水平。因此，多能系统的规划问题可转化为可求解的确定性的优化问题。

在具体应用中，采用我国东部某市 62 节点电网进行分析，并考虑常规火电机组、风电场、气电机组、气转电装置接入。分别计算了该多能系统算例中线路不过负荷置信水平从 0.6 至 1.0 的系统规划方案，提出因置信水平不同而差异化的系统线路扩建方案，为考虑电-气耦合与新能源消纳的电网提供了兼顾可靠性与经济性的规划方法。

2.2 需求侧激励响应建模分析与可调度潜力预测

智能用能的发展是多能系统中能源消费侧的重要部分，有必要对各能源消费(生产)节点的激励响应进行分析，并对各节点可调度潜力进行预测以保障系统运行稳定。运用集对理论^[11]构建能源产销节点对激励机制响应行为的分析模型，其核心思想是统筹考虑确定、不确定系统，运用同异反联系度表达式来具体描述系统中的确定、不确定问题。系统分析中，将对节点的激励响应，转化为特定问题背景下集对的联系度 u 描述：

$$u = s + px + qy \quad (7)$$

式中： s 表示两个集合的同一程度； p 表示两个集合的差异不确定程度； q 表示两个集合的对立程度。考虑到响应分析的动态性，利用马尔可夫链与考虑元素权重的集对分析模型相结合，在 t 时刻将节点用能响应度按照 S_t 、 P_t 、 Q_t 的顺序排序，针对联系度表达式分别计算 S_t 、 P_t 、 Q_t ，在 $[t, t+T]$ 时段内归一化后转移向量，得到户用电响应转移矩阵 M 为

$$M = \begin{bmatrix} M_{11} & M_{12} & M_{13} \\ M_{21} & M_{22} & M_{23} \\ M_{31} & M_{32} & M_{33} \end{bmatrix} \quad (8)$$

根据马尔可夫链的遍历性,随着 k 增大, M_{kT} 趋于稳定,将各时段节点设备调节情况分为高响应 (H)、中响应(M)、低响应(L),表示为

$$u = H + Mx + Ly \quad (9)$$

根据 H 、 M 、 L 的大小,能源产销节点的响应度的动态变化可以进行排序,并对系统整体响应情况进行评估。

随着分布式能源技术的成熟应用,多能系统中能源消费者往往也具备能源生产能力与双向能量互动能力。因此,科学评估该类节点的可调度潜力是实现系统、用户双向友好互动的前提。基于前述考虑电价信号、激励机制或调度控制指令等外部激励互动机制下的响应分析,结合各能源产销节点用能、产能历史数据,得到多重能源产销节点的可调度潜力模型。通过分析不同类型可调度节点所占的比重,整体聚合的可调度潜力的数学结构表征模型可表示为

$$P(t) = \sum_r^R [\beta_r(t) \sum_k^K c_{rk}(t)] \quad (10)$$

式中: $c_{rk}(t)$ 为第 r 类能源产销节点的第 k 个体的可调度潜力; $\beta_m(t)$ 为该类能源产销节点所占比重; $P(t)$ 为多重整体聚合在时刻 t 的可调度潜力。通过建立多重聚合可调度潜力模型,得到可调度潜力评估指标如等效备用容量、响应时间和持续时间等,为合理分析评估区域能源互联调峰能力奠定了基础。

在具体应用中,以多能系统中居民用电激励响应建模为例开展激励响应分析,主要综合考虑居民家中电器配备情况、使用习惯、各类电器功率等,设置各类电器调节对居民用电响应的权重。将全天 24h 分为以每 2h 为一个时段,分析不同时段居民对不同用电设备的调节程度的变化,表 1 所示即为以我国东部某省会城市为案例,结合峰谷电价的时段设置分析得到的居民用电设备调节情况。经求解,即居民用电激励响应稳态联系数为 $u = 0.441 + 0.335x + 0.224y$ 。可以看出居民用电潜在的响应度同一趋势很强,应建立充分的激励机制来挖掘居民用户的响应潜力。同理,对工商业用户采用相同分析方法可以得到对应激励响应表达式,如针对大型商场类典型商业用户,其激励响应稳态联系数为 $u = 0.183 + 0.315x + 0.502y$,用电设备的响应程度较低,对立程度较强。

2.3 区域能源互联网多能系统评估评价体系

构建多能系统具有显著的经济效益、社会效益和生态效益,其发展受到区域能源态势、政策环

表 1 居民用户用电设备调节情况

Tab. 1 The electrical equipment regulation of resident users

电器分类		冰箱	空调器	清洁电器	……
权重		0.02	0.25	0.07	
1	0-2	L	H	H	……
2	2-4	L	H	H	……
3	4-6	L	H	H	……
……					

境、市场形势和技术创新等因素的影响,为全面描述影响系统发展演化的驱动因素,以政策导向类、市场环境类、技术革新类和系统运行类,构建了“双向四维”评价指标体系,如图 3 所示。

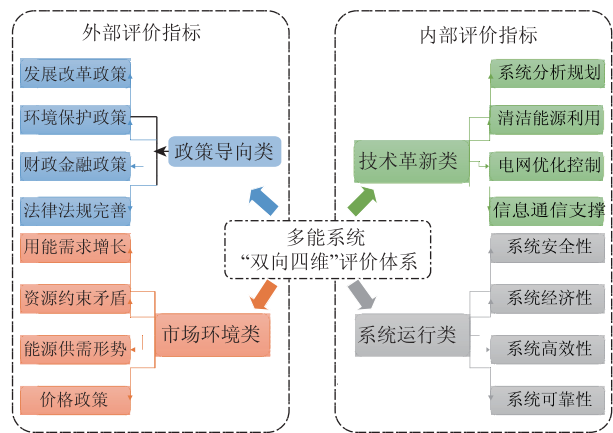


图 3 多能系统“双向四维”评价指标体系

Fig. 3 The evaluation index system of the multi-energy system

其中政策导向类和市场环境类重点从外部评判多能系统的发展态势,为外部评价指标,主要评估系统与经济社会发展的协调适应程度;技术革新类和系统运行类重点从系统内部新技术应用和运行经济稳定性方面评判系统效能,为内部评价指标,主要评判系统自身发展运行的客观水平。

在实际应用中,对于构建的评价指标体系,进一步采用逼近理想解排序法^[12]计算确定各指标的最优权重。对于多能耦合系统不同阶段进行 n 次指标评价,构建指标矩阵 $V = [V_1, V_2, \dots, V_n]^T$,经规范化和加权标准化后,计算评价样本到正理想解、负理想解的欧几里得距离矩阵。同时计算评价样本与正理想解、负理想解灰色关联系数矩阵 U^+ 、 U^- 。综合考虑无量纲化与规范化后的欧几里得距离与灰色关联度,得到评判指标 δ 作为各评价指标的加权重。

进一步,参考 Lotka-Volterra 模型^[13],将多能系统演化发展过程中的驱动力分为他组织、自组

组织和复合组织 3 类组织机理，引入竞争和合作系数，建立自组织和他组织驱动因素协同动力学模型，实现多能耦合系统的发展评价。式(11)、(12)中， a_{12} 表示他组织对自组织的竞争抵消作用， a_{21} 表示自组织对他组织的竞争抵消作用， N_1 表示他组织因素的驱动作用水平， N_2 表示自组织因素的驱动作用水平。

$$\frac{dN_1}{dt} = p_1 N_1 \left(1 - \frac{N_1 - a_{12} N_2 + b_{12} N_2}{q_1}\right) \quad (11)$$

$$\frac{dN_2}{dt} = p_2 N_2 \left(1 - \frac{N_2 - a_{21} N_1 + b_{21} N_1}{q_2}\right) \quad (12)$$

案例验证中，选取浙江省作为能源互联网多能系统评价样本。参考 2010 - 2015 年《浙江能源与利用状况白皮书》和《浙江电力行业节能环保白皮书》，确定评估评价指标体系(部分如表 2 所示)。采用逼近理想解排序法计算得到最优权重后，计算得到协同动力学模型参数中 $a_{12} < b_{12}$ 且 $a_{21} < b_{21}$ ，决定了浙江多能系统发展特征为他组织与自组织之间的合作协同作用大于竞争抵消作用。从而确定了对应发展策略是深化协同战略，支撑了内外部发展战略的制定。

表 2 实际评估指标

Tab. 2 The actual evaluation indexes

公共驱动因素	政策驱动因素	市场驱动因素	技术驱动因素
光伏装机容量	售电侧改革	能源工业投资	专利受理量
风电装机容量	光伏补贴	全社会用电量	专利授权量
CO ₂ 排放量	电力直接交易	全社会发电量	企业研发经费
...

2.4 基于“大云物移”新技术的信息通信支撑体系

多能系统中能量流与信息流的高度融合、多向互通，需充分应用先进的信息通信技术支撑多元化能源生产、智能用能、能源传输、能源交易、用户服务等功能。随着以“大云物移”为代表的信息通信技术的快速发展，信息传输与处理能力的不断提升，实现多能系统全景全息感知、状态仿真、精准识别、智能调度、协调控制和开放互动的信息化条件已渐趋完备，多能耦合互补、能源优化配置、开放互联互动将拥有更强大的技术保障。

在保障多能耦合互联方面，进一步加强以大容量骨干网为核心的信息网络。一方面，通过在多能系统各设备、节点中嵌入智能控制与通信能力，扩展现有通信网络拓扑，实现系统内信息的全域采集；另一方面兼容异种网络的便捷对接，实现不同通信标准和协议的即插即用，支持分布式能源的多

点智能接入，真正实现多能系统的协同运行。同时，充分借助移动智能终端、移动无线通信网络提升通信灵活性、拓展通信通达度。

在提升系统运行效率方面，利用云平台所提供的分布式存储和分布式计算技术，将数据存储和数据计算任务合理优化。借用云平台海量基础设施提供的运算和存储能力，有效接纳多能耦合系统中产生的海量数据，进行实时高效处理，提高数据(信息)存储能力和利用效率。同时实现对于多类型能源网络全景全息感知、实时状态分析、精准识别、协同控制、交互管理等新型智能业务的创新整合。

在促进系统良性发展方面，构建坚强多元的信息一体化平台，为系统各环节提供数据、计算、软件等技术服务。构建安全、稳定、可靠、高效的信息处理和服务平台，保障平台、通信、数据存储、信息转化、业务实现各环节，支撑多能互联策略优化、多能系统发展决策。

3 多能系统综合能源管理系统架构

服务于区域能源互联网的多能系统综合能源管理系统面向整个能源产销链的各参与主体，以多能规划决策技术为依托，基于“大云物移”信息通信技术，以多能协同规划、多能耦合智能分析、多能系统运行评估为核心，具备统筹配置、精准调度、协调控制、开放共享、友好互动等功能。可实现能量流、信息流广泛融合与多向互通，在保障多能耦合系统安全稳定运行的前提下为各参与主体提供评估分析服务与专业预测服务。

浙江省内清洁能源和智能电网发展迅速，电网信息通信体系已经过多年建设完善，具备能源互联网先行发展的基础条件与广阔空间。因此，以浙江为例，对面向浙江能源互联网的综合能源管理系统进行设计对于多能系统的建设具有借鉴意义。

3.1 业务架构设计

系统业务涵盖能量管理、综合能源信息管理、社会公共服务三大领域。其中能量管理是系统实现综合能效提高与分布式可再生能源消纳的核心功能，其满足能源生产、能源调配、能源消费各阶段全用户对能量的管理，包括能源接入容量分析、多能系统智能规划、系统可调度潜力计算、能源产销节点激励响应分析、多能互补综合方案、多能协调优化控制等。系统的业务架构如图 4 所示。

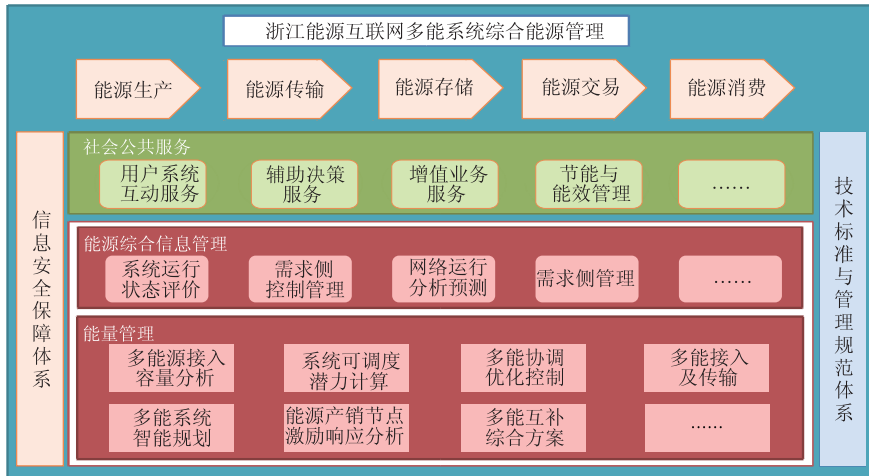


图4 综合能源管理系统业务架构

Fig. 4 The business structure of integrated energy management system

3.2 数据架构设计

系统所涉及的数据主要包括基础数据、分析及服务支持数据、公共服务数据及平台运行数据构成。对于基础数据，通过数据筛选、抽取、清洗和转换，形成完备的体系化基础数据库，为后续的计算分析与决策评价提供数据支撑。基础数据通过系统的运行经营分析及趋势分析等应用形成可直接应用于系统协调控制与优化配置的运行分析支撑数据，该类数据包括可再生能源接入规模、多能网络

拓扑、网架约束等，可被系统能量规划分析、激励响应建模、节点可调度潜力预测、系统评估评价等核心计算模块直接调用。经系统核心模块计算处理后，运行分析支撑数据将进一步整合为系统运行评价数据与公共服务数据，形成不断更新修正的系统规划方案、运行方案、故障处理方案、系统诊断信息等，通过与电网或其他能源企业业务系统接口、移动应用平台或其他途径进行展现，为能源产销链上的各相关主体提供服务。数据架构设计如图5所示。

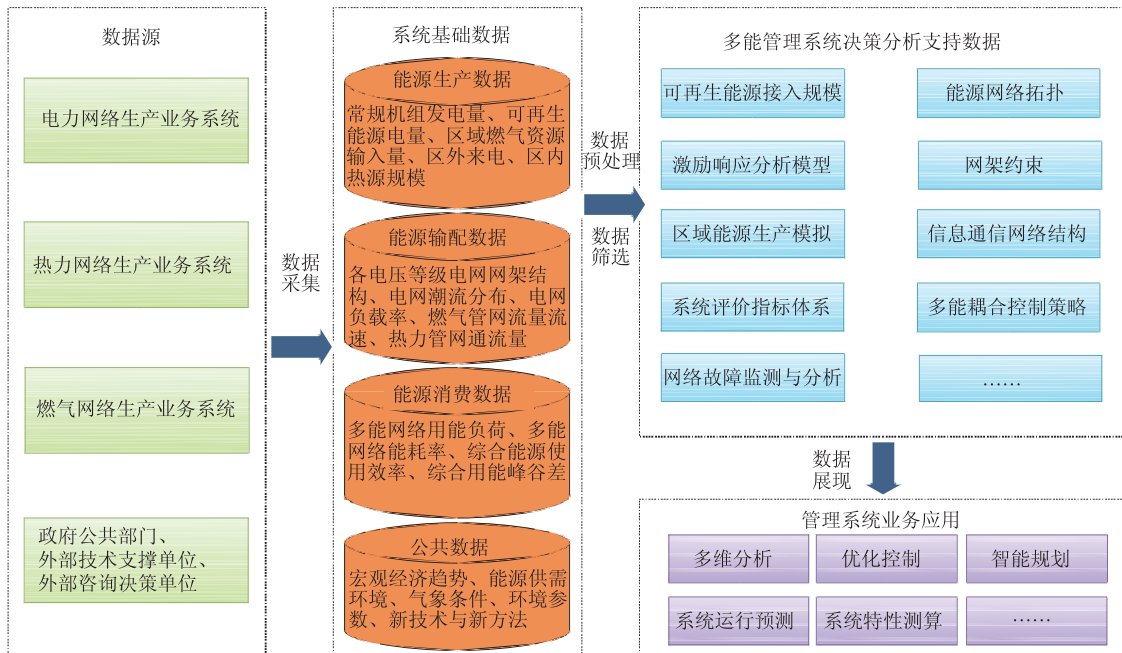


图5 综合能源管理系统数据架构

Fig. 5 The data structure of integrated energy management system

3.3 技术架构设计

系统技术架构根据其数据流向与功能设计划分为 5 层架构, 如图 6 所示。

信息采集层通过广泛分布与电网、气网与热

网不同网络中的智能传感器与分布式控制系统高精度、实时、稳定地采集能量产销各环节的信息, 通过模数转换形成数字信号以多样化的传输信道、传输协议提供至接口转换层。

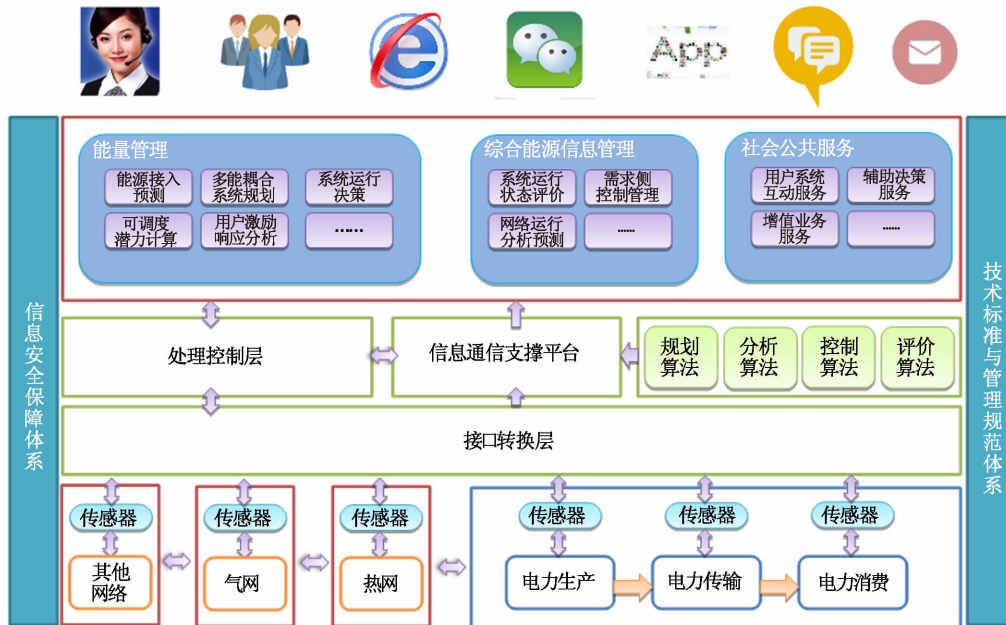


图 6 综合能源管理系统技术架构

Fig. 6 The technology structure of integrated energy management system

接口转换层具备采集数据接口服务和系统集成接口服务。采集数据接口将信息采集层的多源异构数据进行规整化与预处理, 确保多能网络中的信息以统一标准的格式传送至处理控制层。系统集成接口将相关专业管理系统(如 SAP ERP、营销管理系统、生产管理系统)等业务过程数据导入, 实现横向纵向数据汇通。

处理控制层是系统功能核心, 依托部署于“大云物移”信息通信支撑体系云平台中的 Hadoop 技术, 以接口转换层上传的系统运行数据与外部数据为基础, 根据系统规划运行需要调用能量管理系统规划、分析、控制、评价的核心算法, 完成系统核心实现系统多功能分析与多节点控制。

应用服务层基于处理控制层核心模块的调用计算结果向外提供服务支持, 根据实际的服务要求进行数据建模, 实现业务逻辑, 主要包括能量管理、综合能源信息管理、社会公共服务三大类, 完成多能耦合的全域感知与全局掌控。

交互展示层负责将应用服务层的分析结果与

态势分析通过图表、语音、视频等多元化方式进行直观展示, 或通过系统集成接口将运算处理结果反馈回各业务系统。

3.4 系统布置

在系统实际布置应用中, 综合能源管理系统可依托省级电网公司信息内网云平台为核心进行数据信息的存储和处理。具体布置方案中, 系统核心算法、功能模块与管理平台数据库统一布置于信息内网; 系统公共服务外网应用服务器布置在信息外网。系统对外通过防火墙访问信息外网应用服务器, 外网应用服务器通过隔离闸单向访问部署在云平台中的数据库; 对内, 应用服务器采用 SLB(负载均衡)方式访问不同的 ECS(应用服务器), 所有的 ECS 都访问统一的云数据库, 同时, 云平台也可以通过企业服务总线集成营销系统、ERP 系统、短信平台等其他服务。

4 结 论

随着能源互联网由概念设计逐步向构建实施

过渡,以电力为核心的多能系统也将逐渐成形。本文首先讨论了区域能源互联网内涵,分析了区域能源互联网多能系统发展运行所面临的主要挑战,结合多能系统规划决策的关键问题,提出了计及多能不确定性的规划分析技术、系统节点激励响应分析与可调度潜力预测技术,研究构建了信息通信支撑体系和系统评估评价体系,并依据浙江能源互联网发展的实际,开展了针对性案例应用,设计了综合能量管理系统可行架构,为能源互联网多能系统的应用与管理提供参考借鉴。

未来将继续深化能源互联网能量管理系统决策分析技术的应用研究,进一步推动综合能量管理系统从设计方案到落地实施的跨越。

参 考 文 献

- [1] HUANG A Q, CROW M L, HEYDT G T, et al. The future renewable electric energy delivery and management (FREEDM) system; the energy internet [J]. *Proceeding of the IEEE*, 2011, 99(1): 133-148.
- [2] VERMESAN O, BLYSTAD L C, Zafalon R, et al. *Internet of energy connecting energy anywhere anytime* [M]. Springer Berlin Heidelberg, 2011: 33-48.
- [3] 刘振亚. 全球能源互联网 [M]. 北京: 中国电力出版社, 2015: 199-253.
- [4] BOYD J. An internet-inspired electricity grid [J]. *IEEE Spectrum*, 2013, 50(1): 12-14.
- [5] 孙宏斌, 郭庆来, 潘昭光. 能源互联网: 理念、架构与前沿展望 [J]. *电力系统自动化*, 2015, 39(19): 1-8.
- SUN Hongbin, GUO Qinglai, PAN Zhaoguang. Energy internet: concept, architecture and frontier outlook [J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2015, 39(19): 1-8.
- [6] GEIDL M, KLOKL B, KOEPEL G, et al. Energy hubs for the futures [J]. *IEEE Power&Energy Magazine*, 2007, 5(1): 24-30.
- [7] KRAUSE T, ANDERSSON G, FROHLICH K, et al. Multiple-energy carriers: modeling of production, delivery, and consumption [J]. *Proceedings of the IEEE*, 2011, 99(1): 15-27.
- [8] 尹晨晖, 杨德昌, 耿光飞, 等. 德国能源互联网项目总结及其对我国的启示 [J]. *电网技术*, 2015, 39(11): 3040-3043.
- YIN Chenhui, YANG Dechang, GENG Guangfei, et al. Summary of energy internet projects in Germany and its enlightenment to China [J]. *Power System Technology*, 2015, 39(11): 3040-3043.
- [9] 王一波, 许洪华. 基于机会约束规划的并网光伏电站极限容量研究 [J]. *中国电机工程学报*, 2010, 30(22): 22-25.
- WANG Yibo, XU Honghua. Research of capacity limit of grid-connected photovoltaic power station on the basis of chance-constrained programming [J]. *Proceedings of the CSEE*, 2010, 30(22): 22-25.
- [10] 边巧燕, 徐开, 孙黎滢, 等. 考虑风电功率概率分布不确定性的输电系统规划 [J]. *电力系统自动化*, 2015, 39(20): 60-63.
- BIAN Qiaoyan, XU Kai, SUN Liying, et al. Transmission system planning method considering wind power probability distribution [J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2015, 39(20): 60-63.
- [11] SAHEBI M, DUKI E, KIA M, et al. Simultaneous emergency demand response programming and unit commitment programming in comparison with interruptible load contracts [J]. *Generation, Transmission & Distribution, IET*, 2013, 6(7): 605-611.
- [12] 张文朝, 顾雪平. 应用变异系数法和逼近理想解排序法的风电场综合评价 [J]. *电网技术*, 2014, 38(10): 2741-2745.
- ZHANG Wenchao, GU Xueping. Energy internet: driving forces, review and outlook [J]. *Power System Technology*, 2014, 38(10): 3005-3013.
- [13] 陈瑜, 谢富纪. 基于 Lotka-Volterra 模型的光伏产业生态创新系统演化路径的仿生学研究 [J]. *研究与发展管理*, 2012, 24(3): 74-84.
- CHEN Yu, XIE Fuji. The bionics research of evolutionary path of photovoltaic industry's innovation ecosystem based on Lotka-Volterra model [J]. *R & D Management*, 2012, 24(3): 74-84.

收稿日期: 2017-05-08

作者简介:

张利军(1973—), 男, 高级工程师, 研究方向为智能电网、能源互联网、电力系统通信, E-mail: 278594393@qq.com;

徐晨博(1989—), 男, 工程师, 研究方向为智能电网、能源互联网, E-mail: 776392882@qq.com;

范娟娟(1982—) 女, 经济师, 研究方向为智能电网;

袁翔(1982—), 男, 工程师, 研究方向为电力系统信息化;

徐汶(1975—), 男, 高级工程师, 研究方向为电力系统设计;

庄峥宇(1977—), 男, 高级工程师, 研究方向为电力系统通信。

(责任编辑: 林海文)