

新能源系统智能调控理论与方法

耿华^{1*}, 刘浴霜², 何秀强¹, 朱翔¹, 何长军¹

1. 清华大学自动化系, 北京 100084

2. 武汉大学电气与自动化学院, 武汉 430000

* E-mail: genghua@tsinghua.edu.cn

收稿日期: 2025-06-06; 接受日期: 2025-09-16; 网络版发表日期: 2026-01-06

国家自然科学基金联合基金重点支持项目(批准号: U24B2085)资助

摘要 随着新能源规模的快速扩大, 电力系统的安全运行压力陡增. 在新型电力系统的建设中, 面向海量新能源, 传统基于“自上而下”理念设计的控制架构难以保证新能源系统稳定性. 因此, 基于“自下而上”理念设计控制架构以实现新能源系统的智能调控是保障电网安全运行的关键. 类比人类文明的发展历程, 新能源系统的智能调控需从“个体-群体-多群体”三个层面解决“同步-协同-博弈”的问题. 为此, 本文分别从新能源装备同步理论与稳定控制、群体协同理论与频率/电压支撑及多群体博弈理论与运行优化三方面综述了当前理论研究现状及控制技术, 并总结其局限性. 最后, 针对上述理论与技术的不足, 展望了新能源系统智能调控未来可能的发展方向, 为未来含高比例新能源电力系统的安全稳定高效运行提供解决思路和技术指导.

关键词 新能源系统, 智能调控, 同步, 协同, 博弈

1 引言

大力发展新能源是解决环境污染和能源危机的关键途径, 亦是我国实现“碳达峰”和“碳中和”目标的有力举措. 截至2024年6月底, 我国新能源装机容量达11.8亿kW, 约占总装机容量的38.4%, 首次超过煤电装机规模^[1]. 预计到2060年, 我国新能源装机比例将突破60%^[2], 发展空间巨大.

然而, 相较于以化石燃料为主的传统发电系统, 以风光为主的新能源发电系统在端口特性、并网结构及一次能源特征等方面均存在显著差异. 在端口特性方面, 传统发电系统的运行由同步发电机转子运动决定,

因此其端口通常呈电压源特性; 而新能源发电系统的运行主要取决于其并网接口装备电力电子变流器的控制特性^[3,4], 因此其端口可能呈电压源特性, 也可能呈电流源特性. 此外, 由于电力电子变流器具有非线性、低惯量、多时间尺度和切换等特性, 新能源发电系统的端口动态极为复杂^[5,6]. 在并网结构方面, 传统发电系统通常大容量单机/少数机组直接并网, 呈集中式结构; 而新能源发电系统通常是小容量机组大规模集群并网, 呈集中式和分布式并举的结构^[7], 这对系统同步稳定、电压调控及频率响应等动态特性提出了更高要求. 在一次能源特征方面, 传统发电系统在同步发电机组机械惯量支撑下, 可提供平稳的功率输出; 而新能源

引用格式: 耿华, 刘浴霜, 何秀强, 等. 新能源系统智能调控理论与方法. 中国科学: 技术科学, 2026, 56: 134–156

Geng H, Liu Y S, He X Q, et al. Theories and methods of intelligent regulation and control in renewable energy systems (in Chinese). Sci Sin Tech, 2026, 56: 134–156, doi: 10.1360/SST-2025-0132

发电系统出力依赖于气象因素, 且其接口装备电力电子变流器惯量低下, 导致其输出功率呈现随机性、间歇性和波动性^[8,9]. 由于上述特性的不同, 电力系统安全高效运行压力剧增, 近年来事故频发. 例如, 2014年我国新疆天中直流近区电网暂态过压^[10], 2015年我国新疆哈密地区宽频振荡^[11], 2016年我国河北沽源次同步振荡^[12], 2019年英国英格兰与威尔士电网频率失稳^[13], 2021年美国得克萨斯州新能源同步失稳^[14]等.

从控制架构角度, 传统发电系统中同步发电机单机容量大、个体数少、信息量小, 因此可通过集中式数据分析和通信, 对系统“自上而下”分层调控以维持其稳定^[15,16]. 例如, 当前电力系统分别在各层级收集数据和信息至该层级的中央控制器进行分析, 并从“国调-区调-省调-地调-县调”层层下发指令, 进而将控制信号发送至“场站”, 最后直至“装备”. 此调控方案优先满足上层整体功率需求, 再向底层个体分配任务, 在个体数量不多且功率输出稳定的情况下可保证系统的高效运行. 然而, 在个体数量剧增时, 传统基于“自上而下”理念的集中式分层控制架构难以实现个体的精细化调控.

随着新能源大规模并网, 新能源装备单机容量小, 因此个体数较多、信息量巨大. 若仍采用传统基于“自上而下”理念的集中式分层控制架构, 系统控制将面临数据量骤增而导致的维数灾难题, 高性能实时控制成为重要挑战^[17,18]. 此外, 考虑到新能源发电具有随机性、间歇性与波动性的特点, 新能源装备需要精细化调控, 而传统集中式分层控制架构难以有效管理各发电单元^[19], 甚至可能恶化整体电网的动态特性. 在此架构下, 新能源自身的稳定控制能力未被充分发挥. 因此, 亟需探索新的控制架构以实现新能源系统的智能调控. 一方面, 新控制架构需充分发挥新能源自身的稳定控制能力, 且可实现新能源个体精细化调控; 另一方面, 可考虑利用新能源对电网进行支撑. 基于“自下而上”的理念设计控制架构是极具发展潜力的方案, 通过优先保证底层个体稳定运行, 再对上层整体进行支撑, 将有助于在个体规模巨大且输出功率波动的情况下实现系统安全高效运行.

基于上述分析, 本文将梳理总结当前新能源系统的调控技术, 并深入探讨在未来新能源占比更高, 甚至100%新能源的情况下, 如何基于“自下而上”的理念搭建智能调控架构, 以保证新能源稳定并网、快速支

撑与高效消纳, 为高比例新能源电力系统的安全运行提供坚实的理论基础与技术支撑.

2 自下而上分层式智能调控架构

人类社会在漫长的进化过程中, 已发展出基于“自下而上”理念的治理架构, 为新能源系统的智能调控提供了重要启示. 在人类社会中, 个体需遵循道德规范, 与群体步调一致; 多个体构成群体, 通过合作解决复杂问题以保证生存; 多群体构成社会, 通过协商解决矛盾与纷争以推动发展, 从而造就了人类文明的繁荣, 如图1(a)所示. 这种“自下而上”层层递进的机制, 为新能源系统的智能化调控架构设计提供了借鉴.

将新能源发电系统与人类社会类比, 可定义基于“自下而上”理念设计的新能源发电系统“个体-群体-多群体”控制架构: 个体需同步, 方能稳定并网; 群体需协同, 方能快速支撑; 多群体需通过博弈实现共赢, 方能高效消纳, 形成智慧能源“文明”, 如图1(b)所示. 从实现方法的角度来看: 同步过程快, 通常可采用基于机理的方法; 协同过程稍慢, 可采用机理和数据混合驱动的方法; 博弈过程最慢, 主要采用数据驱动方法.

基于上述分析可知, 新能源系统的智能调控需从“个体同步-群体协同-多群体博弈”三方面逐层满足稳定并网、(频率/电压)快速支撑和高效运行的需求, 如图2所示. 其中, 个体层为了实现快速响应, 通常基于本地信息直接控制, 因此采取分散式控制^[20]. 向分散式控制器中输入单机 i ($i = 1, 2, \dots, k$)的功率指令 $P_{\text{ref}i}$ 、端口电压 v_i 和电流 i_i , 其可输出虚拟功角 δ_i , 进行个体同步控制, 以实现稳定并网. 群体层由于个体数多、信息量大, 集中式控制易出现维数灾难题, 因此可采取分布式控制^[21]. 向分布式控制器中输入群体 j ($j = 1, 2, \dots, h$)的最优功率指令 $P_{\text{optref}j}$ 、装备 i 端口电压 v_i 和频率 ω_i , 其通过与群体内相邻分布式控制器进行信息交互, 可输出单机功率指令 $P_{\text{ref}i}$, 进行群体协同控制, 以实现频率/电压快速支撑. 多群体层通常根据其期望实现的全局或局部最优目标, 采取集中或分布式控制^[22,23]. 向集中或分布式控制器中输入实时电价 s 、电网节点 j 的电压 $v_{\text{node}j}$ 和频率 $\omega_{\text{node}j}$, 其可输出群体最优功率指令 $P_{\text{optref}j}$, 进行多群体博弈优化, 以实现高效运行. 三层控制器逐层传递控制信息, 各层输出控制指令均为下层控制器的输入信号, 层层配合, 共同保障新能

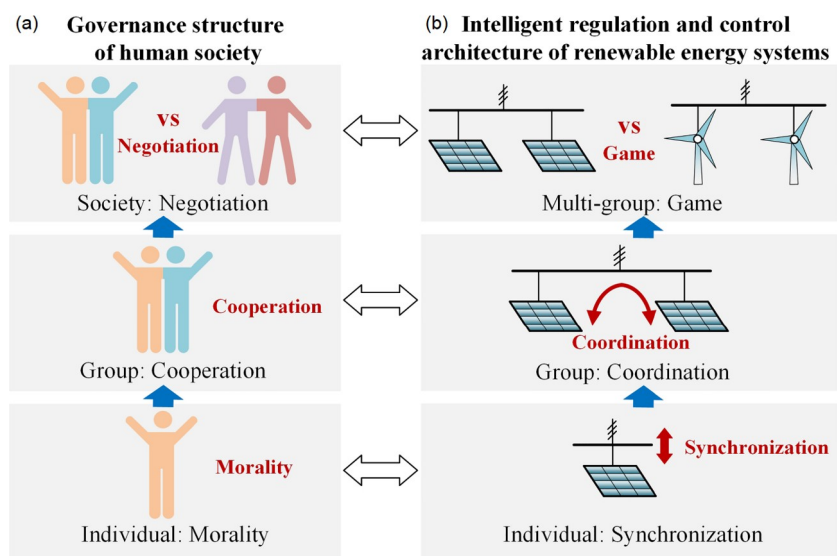


图 1 (网络版彩图) (a) 人类社会与(b) 新能源系统“自下而上”分层式调控架构类比

Figure 1 (Color online) Analogy of bottom-up hierarchical regulation and control framework between human society (a) and renewable energy systems (b).

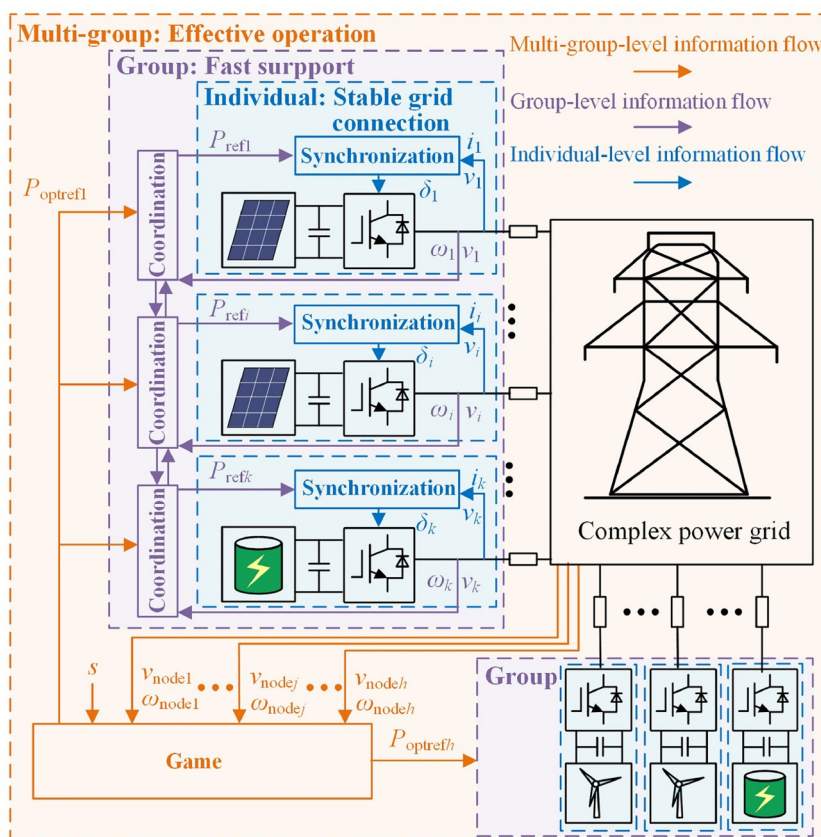


图 2 (网络版彩图) “同步-协同-博弈”分层式智能调控架构示意图

Figure 2 (Color online) Diagram of hierarchical intelligent regulation and control framework: synchronization, coordination, and game.

源系统安全高效运行。

当前已有部分面向新能源同步-协同-博弈的相关研究, 本文将分别从新能源装备同步理论与稳定控制、新能源群体协同理论与频率/电压支撑、新能源多群体博弈理论与运行优化三方面综述当前已有研究进展, 分析现有方法局限性, 并提出适用于海量新能源通过复杂电网互联场景下的智能调控体系构建思路。

3 新能源装备同步理论与稳定控制

随着新能源渗透率的快速提升, 新能源并网装备的强时变性、低惯量、非线性等特性深刻影响电力系统的动态特性。尤其在海量异构新能源通过复杂电力网络连接时, 电力系统的同步响应特性与传统电力系统大为不同。当前大量研究均类比传统电力系统, 采用与同步发电机类似的方法进行同步稳定理论研究, 即将新能源装备并网系统简化为单机-无穷大系统, 假设系统电压恒定, 仅关注其同步动态。然而, 类比传统电力系统的分析和控制方法实际上难以适用于新能源系统的同步稳定运行需求, 其核心矛盾体现在两方面: ①海量异构新能源装备经复杂电力网络互联, 无穷大电网无法反映新能源电网特性; ②装备电压、频率动态在网络连接作用下发生耦合, 传统基于“电压恒定假设”的同步稳定分析框架无法适应频率-电压耦合下新能源装备的同步稳定运行需求。在此背景下, 同步理论逐渐从单变量稳定分析, 向多变量动态耦合的稳定分析拓展, 以应对新型电力系统在复杂电网、多变量扰动场景下的稳定性问题。

传统同步理论与广义同步理论分别代表了不同发展阶段的技术响应: 前者类比同步机响应特性, 主要聚焦单变量同步稳定; 后者考虑新能源装备经由复杂电网互联下频率-电压动态耦合, 关注多变量同步稳定, 为高比例新能源系统的安全运行提供理论支撑。本节将系统阐述两类同步理论的核心方法及其优势与局限性, 并梳理两类同步理论框架下装备的稳定控制方法。

3.1 装备同步理论

3.1.1 装备常规同步理论

目前, 针对新能源装备常规同步理论研究主要聚焦于单机或多机集中式并网下的同步稳定判别及稳定机理分析。新能源系统中常规同步主要指发电单元(包

括同步发电机和新能源发电装备)之间及发电单元和电网之间保持频率一致的现象^[24]。常用的新能源装备常规同步稳定判别方法大致可以分为能量函数法、等面积法、相图法以及时域解析法等, 并通过相应方法揭示装备同步稳定机理。

能量函数是一种基于李雅普诺夫稳定性理论的分析工具。此方法通过构造可量化系统运行过程中能量变化的标量函数, 并比较该函数与临界能量的大小来评估系统同步稳定性。当前新能源装备能量函数通常通过首次积分^[25]、T-S模糊函数^[26]以及哈密顿函数^[27]等方法构建, 通过绘制系统能量等势面和对比系统能量与临界能量来估计系统的吸引域范围, 如图3(a)所示^[28]。从能量的角度分析发现, 当新能源装备运行至不稳定平衡点时若系统动能大于零, 则系统会越过不稳定平衡点向外发散。因此, 为了保持新能源装备同步稳定运行, 其初始能量需小于不稳定平衡点处势能与从初始位置到不稳定平衡点间耗散能量之和, 即其临界能量。此方法能够直观地描述大扰动下系统的动态响应特性, 并从能量的角度揭示系统同步稳定机理。然而, 由于能量函数缺乏标准化构造方法, 适用于系统解析的能量函数难以构造。

等面积法是能量函数法的可视化表达, 通过比较新能源装备功角曲线中加速面积与最大减速面积, 来判别装备同步稳定性并揭示其稳定机理。类比同步发电机功角曲线, 可刻画新能源装备虚拟功角曲线, 如图3(b)所示^[29]。基于等面积法分析可知, 若装备加速面积大于最大减速面积, 则其会越过不稳定平衡点继续向外发散, 因而失同步。因此, 若使得新能源装备加速面积小于最大减速面积, 即其在到达不稳定平衡点前便可减速至零, 则其可与电网保持同步稳定, 并在阻尼作用下回到稳定平衡点^[30,31]。等面积法可直观展示新能源装备的同步稳定机理, 但由于忽略负阻尼影响, 所得同步稳定判别结论较为保守^[32]。

相图法基于对新能源装备动力学模型的数值求解, 在相平面中刻画装备在特定参数与工况下的工作点运行轨迹, 通过其运行轨迹的发散或收敛判别同步稳定性, 如图3(c)所示。从初始稳定平衡点出发, 若相轨迹发散, 则装备与电网失同步; 反之, 若相轨迹能够收敛至扰动后的稳定平衡点处, 则装备保持与电网同步^[33-35]。同时, 从不稳定平衡点出发, 采用反向积分法可得装备吸引域^[36]。若初始运行点落在吸引域内, 则

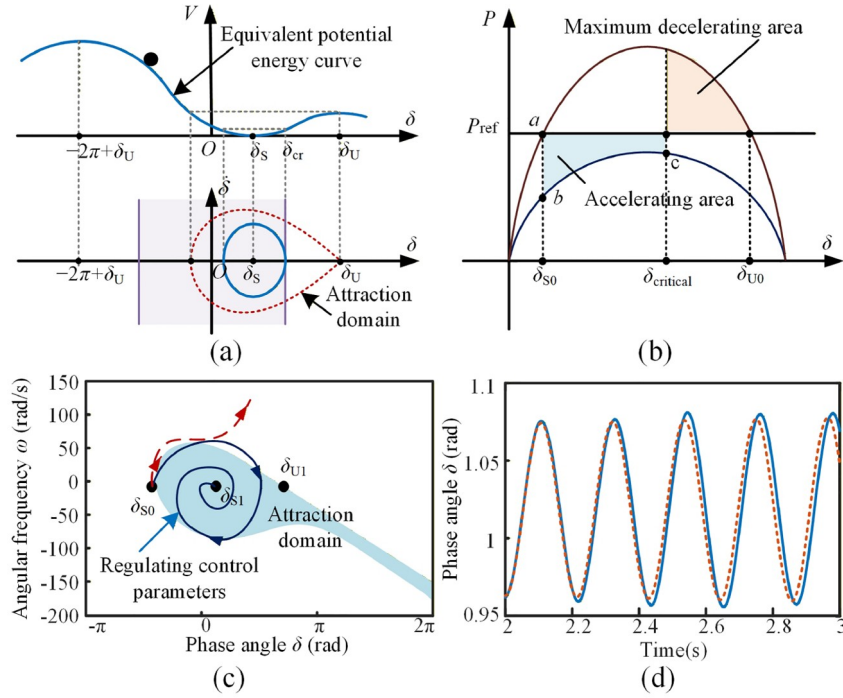


图3 (网络版彩图)新能源装备常规同步稳定分析示意图. (a) 能量函数法^[28]; (b) 等面积法则^[29]; (c) 相图法^[33]; (d) 时域解析法^[38]

Figure 3 (Color online) Schematic diagram of common synchronization stability analysis of renewable energy devices. (a) Energy function ^[28]; (b) equal-area method ^[29]; (c) phase diagram ^[33]; (d) time-domain analytical method ^[38].

同步稳定; 反之, 同步失稳^[37]. 虽然相图法能够清晰描述扰动下新能源装备的相轨迹, 但该方法仅针对特定参数及工况, 无法定量解析装备时域响应. 时域解析法通常采用泰勒级数展开并网装备非线性动态方程中的三角函数, 从而求解装备响应的解析解, 绘制装备状态量随时间变化的动态轨迹, 如图3(d)所示, 根据解析解是否收敛推导装备同步稳定判据, 从而判别装备同步稳定性^[38,39]. 虽然时域解析法可解析新能源装备同步动态, 但该方法计算过程较为复杂, 难以面向稳定控制推广使用.

3.1.2 装备广义同步理论

在实际工程应用中, 海量异构新能源经由电力网络互联, 常规同步稳定分析均将复杂电网简化为与阻抗串联的电压源, 无法反映电力网络的复杂连接对系统同步稳定性的影响; 且此时系统频率-电压多变量复杂耦合, 上述基于单变量的常规同步稳定分析方法不再适用. 因此, 亟需进一步分析复杂电网连接下新能源装备的同步稳定运行能力.

已有工作针对复杂电网连接下海量分布式新能源系统的同步稳定进行了初步研究. 考虑到复杂电网连接带来的频率-电压耦合问题, 清华大学刘锋团队^[40]提出了“强同步”的概念. 强同步指新能源系统各节点频率一致、电压平稳的现象. 为了实现新能源系统的强同步, 刘锋团队提出了输入/输出微分无源性的概念, 如图4(a)所示. 并以此为基础^[41], 结合节点频率/电压动态与网络有功/无功潮流建立新能源系统反馈互联模型, 进行系统的强同步稳定分析. 理论研究表明, 网络潮流通常具有输入微分无源性, 而网络损耗会影响其输入无源性程度, 若节点侧过剩的输出微分无源性能够弥补网络侧不足的输入微分无源性, 便可实现系统整体的强同步稳定. 因此, 可通过输出微分无源性提出节点动态的稳定性条件, 通过控制新能源装备响应行为规范节点动态特性, 从而保证整个互联系统的强同步^[40]. 然而, 上述研究所提理论须假设平衡点存在, 在海量分布式新能源互联的无中心电力系统中, 若无潮流调度, 系统平衡点存在性难以保证, 基于输入/输出微分无源性的强同步稳定分析方法也将难以

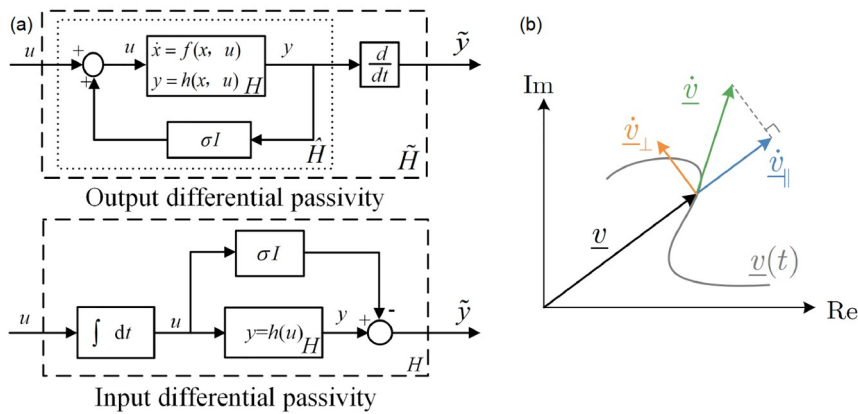


图4 (网络版彩图)新能源装备广义同步稳定分析示意图. (a) 基于输入/输出微分无源性的强同步稳定分析^[40]; (b) 复频率同步稳定分析^[43]

Figure 4 (Color online) Schematic diagram of generalized synchronization stability analysis of renewable energy devices. (a) Augmented synchronization stability analysis based on input/output differential passivity^[40]; (b) complex frequency synchronization stability analysis^[43].

适用.

复频率方法是一种将传统电力系统的频率动态扩展至复数域的新型建模分析方法, 能够有效地描述频率与电压的动态耦合特性^[42]. 复频率以电压幅值变化率和角频率作为其实部和虚部, 其导数可分解为一个与复电压平行的径向分量和一个与复电压垂直的旋转分量, 如图4(b)所示. 基于复频率的定义, 衍生出“复频率同步”的概念, 即新能源系统各节点复频率收敛至定值的现象^[43]. 相较于强同步, 复频率同步不要求电压收敛至定值, 仅需各节点电压变化率一致, 且频率一致. 为了分析系统的复频率同步稳定性, 已有研究基于网络及各类节点的复频率动态方程, 构建复频率坐标系下系统节点-网络互联模型. 结合Lyapunov能量函数, 可进一步推导系统全局渐近稳定条件, 分析系统在电力网络互联下的复频率同步稳定特性^[44~46]. 然而, 目前相关研究仅针对采用复下垂控制或虚拟振荡器控制的新能源装备并网系统, 并未关注采用传统同步控制(例如锁相环控制、功率同步控制、下垂控制、虚拟同步机控制等)的海量异构新能源装备互联的场景.

3.2 装备同步稳定控制

3.2.1 装备常规同步稳定控制策略

为保证新能源装备的安全稳定运行, 大量工作基于常规同步稳定分析结果, 研究并网装备的同步稳定提升控制方法. 当前新能源装备常规同步稳定控制策

略主要可分为优化控制参数/指令、改变控制结构与调整注入电流三类, 如表1所示.

考虑到新能源装备的动态响应主要由其控制特性决定^[47], 而控制参数/指令直接影响装备控制特性, 因此, 优化控制参数/指令是提升装备同步稳定性最直接的方法. 针对采用锁相环同步的跟网型装备, 可通过减小有功电流指令^[48]、增大锁相环比例系数^[34]等方式实现稳定控制; 而针对采用功率环/虚拟同步机控制等同步的构网型装备, 可通过减小有功功率指令^[49]、增加等效阻尼系数^[50]等方式实现稳定控制.

改变新能源装备的控制结构也是提升其常规同步稳定性的有效方法. 对于跟网型新能源装备, 已有研究提出了冻结锁相环^[35]或其积分^[34]、电压归一化^[51]、增强阻尼^[34]等方法, 提升跟网型装备的同步运行能力. 对于构网型新能源装备, 可通过混合同步控制^[52]、有功环负反馈^[49]或无功环正反馈^[53]等方法提升构网型装备的常规同步稳定性.

新能源装备由于过流能力有限, 通常在控制器中添加限幅环节以避免过电流冲击. 通过限幅环节, 可在限制装备输出电流幅值的同时, 合理分配有功/无功电流, 以保证装备同步稳定运行^[48]. 对于跟网型新能源装备, 根据限幅值和故障期间电网阻抗角调整参考电流幅值和相位的自适应电流注入法能够保证装备与电网间同步运行^[54]. 对于构网型新能源装备, 可通过动态电流限幅^[55~57]等方法, 调节装备输出电流相位, 改善装备在故障期间的稳定运行能力.

表 1 新能源装备同步稳定控制

Table 1 Synchronization stabilized control of renewable energy devices

Method category	Specific scheme	Advantages/ Disadvantages
Common synchronization stability control	Reducing active current/power command	Reduces overcurrent risk and increases reactive power support/ Exacerbates active power deficit ^[48,49]
	Optimizing control parameters/commands	Improves response speed and operates simply/ Excessive gain may cause oscillations ^[34]
	Increasing PLL proportional gain	
	Increasing equivalent damping coefficient	Suppresses power oscillations/ Reduces dynamic response speed ^[50]
	Freezing PLL or its integrator	Reduces phase error/ Unable to handle grid phase jumps ^[34,35]
	Changing control structure	Voltage normalization Avoids abnormal current commands due to voltage fluctuations/ Relies on accurate voltage measurement ^[51]
		Hybrid synchronization control Avoids synchronization instability during fault switching/ Parameter design is difficult and may cause oscillations ^[52]
		Power loop feedback Autonomously balances supply and demand power / Requires high precision in feedback loop parameter design ^[49]
Generalized synchronization control	Adjusting injected current	Adaptive current injection Actively compensates for synchronization deviation/ Requires high modeling accuracy ^[54]
		Dynamic current limiting Directly avoids overcurrent risk/ Introduces control switching issues ^[55-57]
	Changing control structure	I/O transformation-based differential passivity control Enables strong synchronization in the distributed autonomous operation status/ Requires high input-output accuracy ^[40]
	Adjust power distribution	Dynamic complex droop control Achieves unified frequency-voltage regulation/ Difficult to use with traditional grid-following controls (phase-locked loop, virtual synchronous generator control, etc.) ^[58]

3.2.2 装备广义同步稳定控制策略

当前稳定控制策略大多基于常规同步理论对装备进行控制设计, 通常在同步旋转坐标系下实施, 假设电网为电压恒定, 仅控制单变量虚拟功角动态, 并未考虑海量分布式新能源经由复杂电网互联场景下电压波动对频率动态的影响. 虽然常规同步稳定控制在频率与电压动态近似解耦的传统电网条件下表现良好, 但当将其应用于海量新能源通过复杂电网互联的场景时, 系统呈现出频率-电压强耦合特性, 此时常规同步控制方法难以保证系统的同步稳定性. 为进一步提升复杂电网连接下新能源装备的同步稳定运行能力, 需要基于广义同步理论研究装备稳定控制策略. 当前广义同步稳定控制策略主要有改变控制结构和调整功率分配两类, 如表1所示.

根据强同步理论, 已有研究提出了基于I/O变换的输入输出微分无源控制方法以提升新能源装备的同步稳定性^[40]. 通过在原系统增加输入前馈和输出反馈回

路, 使得由部分节点和部分耦合网络组成的子系统的动态满足输入输出微分无源性条件, 通过保证所有子系统的输入输出微分无源性实现整个新能源装备互联系统的强同步. 此方法通常在极坐标系下实施, 为多变量控制, 同时控制节点电压和相角动态. 此方法能有效解决频率-电压强耦合工况下新能源系统的同步稳定问题, 且操作便捷、便于实施, 可实现全局稳定性, 这对于保障海量新能源通过复杂电网互联场景下的系统安全稳定运行至关重要.

根据复频率理论, 已有研究提出了动态复下垂控制策略. 通过设计动态增益矩阵合理分配各装备的输出复功率, 将传统静态复数下垂增益转化为动态传递函数, 可实现频率与电压动态的统一协调控制^[58]. 该控制方法通常在复频率坐标系下实施, 同样为多变量控制, 通过控制复相角动态同时调节节点频率和电压. 此方法可解决传统静态控制策略缺乏动态响应能力的问题, 显著提升频率-电压耦合下新能源装备的复频率

同步稳定运行水平, 在通过复杂电网互联的新能源系统中具有重要发展和应用前景.

综合以上分析, 装备常规同步稳定控制与广义同步稳定控制策略的对比总结于表2.

3.3 现状总结及问题

当前基于常规同步理论的稳定控制策略均类比同步发电机, 将新能源并网系统看作单机-无穷大系统, 在电网电压恒定的假设下保证系统同步稳定. 然而, 随着海量新能源分布式并网, 无穷大电网无法反映含高比例新能源的电网动态; 且由于新能源通过复杂电网互联, 系统频率-电压耦合, 基于电压稳定假设的传统稳定控制策略不再适用于海量新能源频率-电压耦合的场景. 最新研究提出了基于广义同步理论的稳定控制策略, 包括输入输出微分无源控制及动态下垂控制等. 然而, 上述广义稳定控制策略仅在构网型新能源经由复杂电网互联的系统中进行了设计, 并未扩展至跟/构网型新能源装备混联的复杂电网中; 且当前广义稳定控制均假设网络结构已知, 无法在网络结构未知时保证装备同步稳定. 在实际并网系统中, 海量新能源空间上分散分布, 电网结构庞大复杂, 难以提

前知晓所研究的网络结构及新能源分布, 且新能源通常控制上异构. 因此, 复杂电网连接下新能源并网系统同步稳定控制策略仍有待深入研究.

4 新能源群体协同理论与频率/电压支撑

为保障电网的安全稳定运行, 作为主力电源之一的新能源群体需具备主动支撑电网电压和频率的能力. 然而, 在新能源大规模接入的背景下, 新能源群体在电网频率电压支撑方面面临诸多挑战. 一方面, 新能源接入规模巨大, 而且源侧功率特性具有显著的时变性与差异性; 另一方面, 新能源群体在参与电网电压和频率响应时, 其动态特性在时间尺度与空间分布等多个维度上呈现复杂耦合的特征. 因此, 实现对海量、时变、多样且时空耦合的新能源群体的协同功率调控, 已成为频率电压支撑的核心挑战.

当前电力系统中, 新能源装备频率电压调节的基本规范(电网导则等)和控制架构与传统电力系统保持一致. 该传统架构难以应对未来新型电力系统频率电压稳定运行的需求, 其核心矛盾体现在两方面. ①传统集中式频率电压响应的分析与规范的制定难以

表 2 常规同步稳定控制与广义同步稳定控制策略对比

Table 2 Comparison between common synchronization control and generalized synchronization control

Comparison dimension	Common synchronization control	Generalized synchronization control	
		Input-output differential passivity-based control	Dynamic complex droop control
Control type	Single-variable control	Multi-variable control	Multi-variable control
Control variables	Virtual power angle $\delta = \theta_{VSC} - \theta_g$	Node voltage u_k Phase angle θ_k	Complex phase angle $\bar{\theta}_k = u_k + j\theta_k$
Control method	Grid-following control: synchronizing with grid based on voltage orientation. Grid-forming control: actively constructing voltage magnitude and phase based on power control	Satisfying the input-output differential passivity conditions by adding input feedback and output feedback to the original synchronization control	Achieving unified regulation of frequency-voltage dynamics by dynamically adjusting the complex frequency droop control gain matrix
Coordinate system	Synchronous rotating coordinate system	Polar coordinate system	Complex frequency coordinate system
Solved problems	Synchronization stability under frequency-voltage decoupling; unable to address synchronization stability under frequency-voltage coupling	Able to address strong synchronization stability problems under frequency-voltage coupling	Able to address complex frequency synchronization stability problems under frequency-voltage coupling
Advantages	Easy to implement	Easy to implement and able to achieve global stability	Able to realize the unified dynamic regulation of frequency and voltage
Applicable scenarios	Traditional power systems or systems where renewable energy is centrally integrated into the traditional grid	Renewable energy systems interconnected through complex grids	Renewable energy systems interconnected through complex grids

计及新能源群体频率电压响应时空多维度耦合的特征。例如,传统集中式的动态响应模型难以计及新能源群体在多维度之间(时间尺度、空间分布、电压-频率维度)的耦合特性,未能准确描述系统频率电压动态特性,而详细模型存在维数灾问题,难以用于分析或求解。②传统集中式的控制架构无法适应海量、时变、多样新能源装备的功率调控需求。具体而言,传统集中式的控制架构和调控策略主要面向个体数量不多且功率特性平稳的传统发电装备,难以满足海量新能源装备个性化、精细化的功率调控要求,也难以遵循不同装备时变化的支撑能力约束。

在新型电力系统背景下,新能源群体频率电压支撑机制面临根本性重构难题。建立满足频率电压多维度耦合的动静态性能需求且兼容海量、时变、多样新能源装备精细化功率调控的频率电压协同支撑体系,成为破解新型电力系统频率电压稳定运行难题的关键科学问题。为此,频率电压分布式支撑理论以及分布式协同控制为破解上述难题提供了创新的方法论。在频率电压分布式支撑理论中,通过建模和分析新能源群体频率和电压的动态特性,提出能够表征群体频率和电压响应特性的集总指标以及表征装备支撑能力的分布式指标,考虑频率和电压响应需求,基于分布式指标制定装备频率电压支撑的电网导则规范。在频率电压分布式协同控制中,以分布式指标规范为控制目标,基于不同新能源装备的支撑能力,通过各装备间实时信息交互与支撑能力互济,建立新能源群体频率电压分布式协同支撑架构。

4.1 群体协同理论

4.1.1 新能源群体网络化系统建模

新能源大规模接入使得电网频率和电压控制面临全新的挑战,传统简化的聚合式频率响应模型^[59]难以同时捕捉群体中各装备在时间尺度、空间分布以及频率电压耦合方面的动态特征,而细化的集中式模型^[60]虽然能准确描述单元动态,但却存在“维数灾”的问题,分析复杂度极高。为此,近年来国内外学者从网络化系统的角度,尝试探索新能源群体频率电压支撑的分布式建模和分析理论,力图构建一个既能反映整体群体响应,又能兼顾单元间动态差异的建模与分析体系^[61,62]。网络化系统建模通常基于图论模型,包含节点、边和网络拓扑等元素。对于新能源集群网络系统,

电力网络本身构成一个图,因此可用图论中的拉普拉斯矩阵表示网络拓扑和输电线路(Kron消去内部节点^[63]);网络节点的本地动态由响应新能源装备的动态方程决定,如图5所示。该网络化系统建模使得网络部分和装备部分相互分离,因此可单独分析网络部分的耦合特性以及每台装备的动态特性。该建模方法已被用于研究电力系统的频率同步、安全和控制等^[61,62]。

4.1.2 新能源群体频率电压支撑指标

基于上述网络化系统建模,已有国内外学者针对网络和节点装备提出频率电压支撑指标,一方面表征频率电压响应的特性和能力,另一方面可用于制定频率电压响应的导则规范。浙江大学辛焕海等人^[64,65]提出了描述电力网络强度的广义短路比指标,并将其用于电压稳定和支撑研究。在频率稳定性方面,辛焕海等人^[66]建立了装备节点频率动态与系统共模频率动态之间的解析关系,为分布式频率支撑奠定了基础。在频率电压综合方面,其提出了描述单个装备接入无穷大电网情形下装备对电网的支撑指标,然后建立了该指标与网络系统频率电压强度之间的定量关系^[67]。苏黎世联邦理工学院Florian Dörfler等人^[68,69]提出了频率电压响应传递函数的指标以及动态参与因子,用于代表新能源装备提供有功和无功支撑的贡献能力。浙江大学徐政^[70]提出了新能源装备等效惯量提升因子和稳态频率偏差下降因子,用于描述电网频率支撑强度的贡献。东北电力大学李国庆等人^[71]在其综述中论文中面向全局频率安全指标(如最大频率变化率、最大频率偏移、准稳态偏差),综述了节点频率安全指标和频率时空差异指标,但这些节点的指标主要用于仿真或者实际结果的评估,而难以用于理论分析。总体而言,当前文献中已提出一些描述新能源参与系统频率电压响应支撑的指标,但基于这些指标,能否构建起系统频率电压和装备频率电压之间的定量关系,以及能否将这些指标用于指导装备频率电压的控制设计,仍是需要进一步研究的问题。

4.1.3 新能源群体频率电压支撑导则规范

当前电力系统中,新能源参与电网频率电压支撑的电网导则规范基本遵循了与传统发电装备类似的要求,例如惯量响应、一次调频、一次调压要求等^[72]。然而,这些规范要求主要适用于传统同步机主导的电

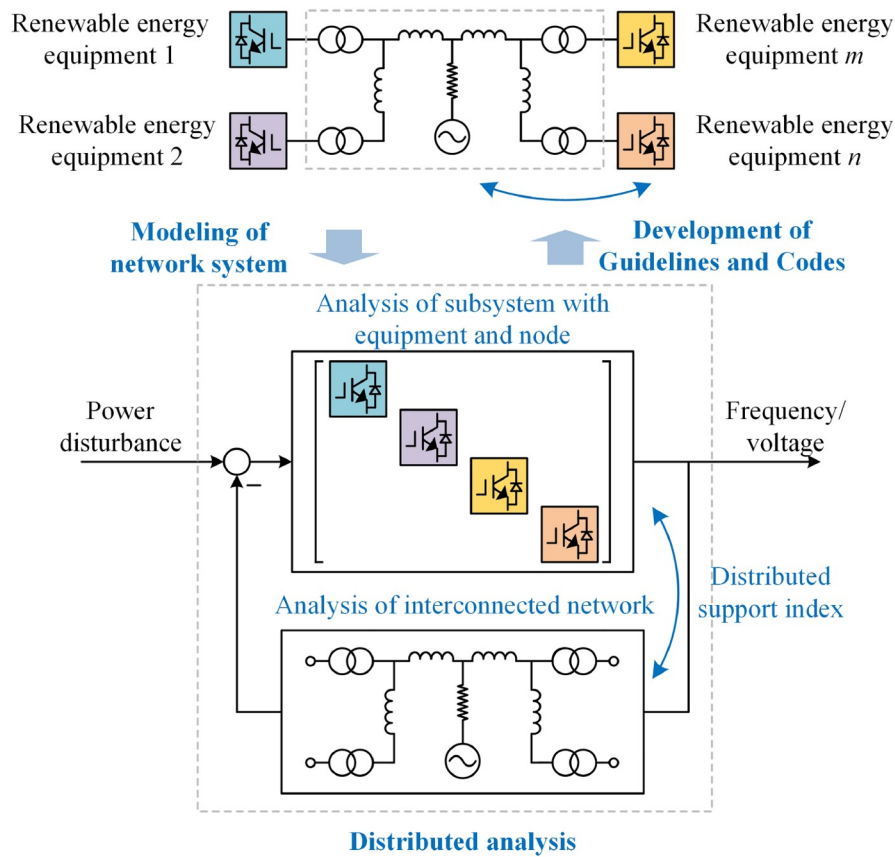


图 5 (网络版彩图) 新能源群体频率/电压分布式建模与分析示意图

Figure 5 (Color online) Diagram of frequency/voltage distributed modeling and analysis of renewable energy generation groups.

力系统, 可能难以保证未来新能源高占比的系统的频率电压安全稳定性能。近年来, 也有很多国内外机构针对新型新能源装备(构网型装备)提出了新的频率电压支撑要求, 如快速频率响应、电压源式的快速无功支撑等。然而, 这些要求基本从装备层面出发, 对新能源装备的功率支撑提出了相对已有规范更高的要求(例如频率响应和无功支撑更快等)。目前缺乏能够保证系统频率电压动态多元性能以及完全适应海量、时变、多样新能源装备功率调控能力的电网导则规范, 相关研究基本空白。已有研究如文献[73], 提出了能够保证系统频率电压稳定的分布式条件, 但频率电压安全方面仍然缺乏分布式指标规范的研究。

4.2 群体频率/电压支撑控制

4.2.1 新能源群体一次频率电压控制

新能源参与频率电压调节与传统电力系统频率电

压调节的架构类似, 大致可分为一次和二次调节。在一次频率响应中, 新能源通常通过惯量响应和下垂控制等方式实现自发响应。然而, 缺乏系统级的协调机制, 各个单元的响应往往彼此独立, 导致系统整体频率动态性能难以满足预期指标。

近年来, 一些研究关注新能源群体的分布式协同控制, 旨在保证群体集总响应满足预期控制目标。这些工作通过对新能源装备功率控制响应的聚合和分解, 实现了分布式新能源装备间的协同响应。例如, 文献[68]提出了基于“分而治之”的新能源群体协同控制策略, 通过将给定的期望控制目标进行分解, 得到新能源装备的控制目标, 然后在装备上保证其响应满足相应的控制目标, 即可保证新能源群体的响应满足期望目标, 并且将这种控制设计扩展到构网控制^[69]。然而, 实现该一次频率电压协同控制的目标, 需要新能源装备厂商均采用该控制架构。为此, 可将该一次频率电

压协同控制架构纳入相关导则与规范,但在实际推进过程中难以避免多方利益相关者之间诉求不一所引发的矛盾。

此外,基于分布式指标,可进行新能源装备和群体的控制优化设计:首先通过分布式指标来表征新能源装备子系统的动态响应,然后对电网子系统的动态进行等效表征或辨识,最后通过闭环优化求解或反推,可得到最优的装备控制策略。文献[74]以有功-频率以及无功-电压之间的传递函数作为装备的分布式指标,提出了一种“感知-优化”的控制设计策略,使新能源能够提供稳定且最优的频率电压动态辅助服务。文献[75]以新能源装备导纳矩阵的增益(以最小奇异值)为分布式指标,得到了能够保证分布式增益足够小且动态响应优化的鲁棒最优控制。

4.2.2 新能源群体二次频率电压控制

在二次频率调节中,常通过虚拟电厂或负荷聚合等手段,将多个新能源单元聚合为统一体进行控制。尽管此方式在一定程度上提升了可控性,但受限于新能源本身源侧功率的强时变性、多样化运行状态及内部控制策略差异,聚合体的整体响应仍面临较大不确定性,难以保证系统层级的调控目标。同时,聚合内部各装备的控制也受上述因素影响,可能无法有效执行上层下发的控制指令。因此,传统自上而下的虚拟电厂式聚合控制架构在实现频率与电压的多层级协调控制方面,存在显著的挑战与局限。

随着新能源大规模接入对电网频率电压灵活支撑提出更高要求,控制架构与控制设计方面的研究也呈现出从传统集中式向分布式、多层次协同控制转变的趋势。文献[76]考虑频率控制需求,提出了储能系统的分布式调频控制方法。文献[77]综述了频率和电压控制的分布式控制策略等。文献[78]综述了新能源集群分层分布式控制架构和调控策略。

4.3 现状总结及问题

当前新能源群体在频率电压支撑方面的研究仍存在诸多不足。现有建模方法难以同时兼顾新能源装备在时间、空间及频率电压多维度上的耦合动态特性,细化模型虽具精度但计算复杂度过高,难以应用于系统级分析与控制设计。频率电压支撑指标体系尚不完善,现有指标多用于评估,难以支撑理论分析与控制

规范制定,系统级性能与个体支撑能力之间的定量关系尚未明确。此外,现行频率电压调控的电网导则延续传统发电机组的调控架构,难以适应高比例新能源接入下的动态调控需求,缺乏面向海量、时变、多样装备的支撑规范。新能源群体已有分布式协同控制主要针对二次控制,且聚合响应能力亦受源侧不确定性限制;在更快时间尺度的频率电压控制上(如一次控制)目前缺乏面向新能源群体的分布式协同控制架构,已有方法多考虑单装备闭环系统的控制设计和性能优化,未来需要进一步突破多装备分布式优化控制设计方法,实现新能源群体在快速时间尺度上的精细化协同调控。整体而言,新能源群体分布协同调控机制和架构亟待系统性重构。

5 新能源多群体博弈理论与运行优化

在能源转型加速推进的背景下,以高渗透率新能源为核心特征的新型电力系统呈现出强时变性、多尺度耦合的运行特性。源-荷双侧随机波动与海量设备的异构交互,使得系统动态平衡机制发生根本性变革。在此背景下,如何构建兼顾经济性、可靠性与公平性的新能源多群体协调运行范式,成为突破新型电力系统规模化发展及智能调控理论瓶颈的关键科学问题。

传统基于单一主体目标的优化方法难以适应新能源多群体分散自治的运行场景,其核心矛盾体现在两方面:①单一决策模型无法表征多群体利益诉求的异质性;②全局最优解在分布式决策场景下缺乏可实施性。博弈论(game theory)作为研究多智能体策略互动的数学工具,为破解上述困境提供了创新方法论^[79,80]。基于此,当前博弈论在新能源多群体电力系统领域主要沿以下两条技术路径发展^[81]。

(1) 静态博弈理论:假定参与博弈的新能源多群体在同一时间点选择决策(或行动顺序不影响决策,因为后行动者无法观察到先行动者的选择)。群体制定策略时,仅基于对其他群体可能策略的预期,而非实际观察到的行为;

(2) 动态博弈理论:突破“同时决策”假设,参与博弈的新能源多群体按一定顺序行动,且后行动者能观察到先前的行动(至少部分信息)。决策具有时间依赖性,因此多群体决策需考虑历史决策路径。

在新能源多群体电力系统的建设进程中, 基于博弈论的运行优化方法得到了长足发展(如图6所示), 逐渐从理论走向实践, 如德国Enerchain电力交易平台^[82]、青海大学智能微电网系统^[83]等. 本节将分别介绍新能源多群体博弈优化理论和基于该理论的多群体运行优化方法.

5.1 多群体博弈优化理论

5.1.1 博弈论基本概念

通俗来讲, 新能源多群体博弈指由风电、光伏等新能源设备构成的多元群体, 依据自身利益诉求, 在复杂环境中通过运行策略选择与协调, 提升系统整体效率、公平性和稳定性的过程. 一般地, 一个博弈至少包含三个要素: 参与者(player)、策略(strategy)与收益(payload)^[84]. 其中, 参与者指参与博弈的主体, 在本文中就是新能源群体, 用 $N = \{1, 2, \dots, n\}$ 表示 n 个主体参与的博弈; 策略指参与者具体实施的行为, 如新能源容量配比、出力调度等, 用 S_i 表示参与者 $i \in N$ 的策略向量; 收益指参与者在博弈中所获效益, 如经济收益、碳排放减少量等, 用 u_i 表示参与者 $i \in N_i$ 的收益向量. 一个

博弈则可以表示为 $G = \{N; S_1, S_2, \dots, S_n; u_1, u_2, \dots, u_n\}$.

5.1.2 静态博弈理论

静态博弈理论建立在博弈主体均在同一时间点行动的假设上, 根据博弈主体之间是合作还是竞争关系分为合作博弈和非合作博弈. 在合作博弈中, 参与博弈的主体之间通常通过协议形成联盟, 以获取额外收益^[85]. 换言之, 结盟后每个主体分配的收益均大于其不结盟时的收益. 实现“合作共赢”的关键在于结盟后收益分配的合理性. 具体而言, 对于给定的联盟结构及其分配方案, 若部分主体在另一不同联盟中能获得的总收益更高, 则这些主体在利益驱使下将倾向于形成新联盟, 表明当前联盟不稳定. 因此, 联盟的稳定性需满足特定的“稳定分配”条件^[86-88]:

$$\sum_{i \in C} x_i \geq v(C), \quad \forall C \subseteq N, \quad (1)$$

其中, $N = \{1, 2, \dots, n\}$ 表征参与博弈的 n 个主体; C 是 N 的一个子集, 表示 n 个主体可能形成的一个合作联盟; $v(C)$ 表示 C 联盟中所有参与者可能获取到的最高总效益; $\sum_{i \in C} x_i$ 表示稳定分配下 C 联盟中所有参与者的总效益.

在非合作博弈中, 参与博弈的主体相互对抗竞争, 其“理性”要求各主体选择能最大化自身收益的策略. 在此背景下, 博弈的“最优”结果称为“Nash均衡”(Nash equilibrium)^[89,90]. Nash均衡的本质在于, 任何主体单方面偏离均衡策略都无法获得更高收益, 因此, Nash均衡是对非合作博弈结局的一致性预测.

5.1.3 动态博弈理论

与静态博弈的“同步决策”不同, 动态博弈中参与者的行动存在时序性, 即序贯博弈. 后行动者能观察先行决策, 并依据当前信息选择最优策略. 如图7所示, 假定当前共有两个决策者, “先行者”可选择A决策或B决策, 由此衍生出两个“子博弈”, “后行动者”根据“先行者”的决策再决定选择A*决策或B*决策. 由于参与者相继决策, 其策略选择依赖于决策前获得的信息^[91]. 动态博弈的核心在于策略的路径依赖性及信息结构的动态演化. 其均衡条件, 即子博弈精炼Nash均衡, 要求: 对原博弈(Ψ)任意的子博弈(ψ'), 策略组合(s^*)均是 ψ' 的Nash均衡.

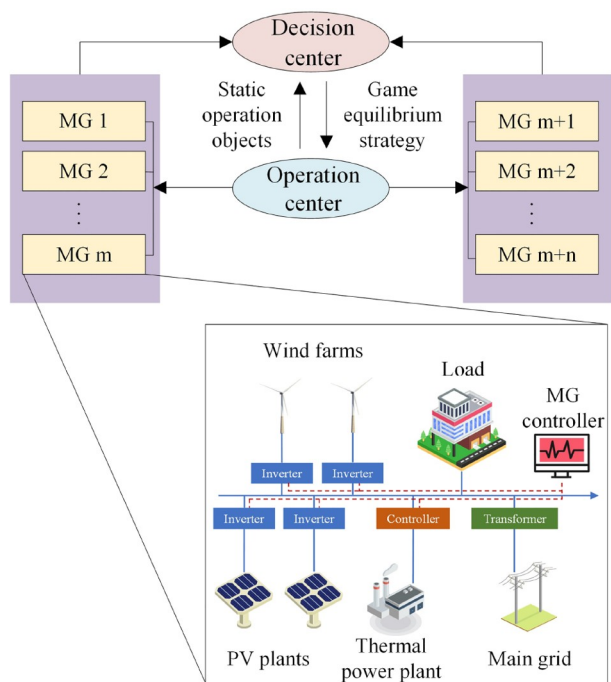


图6 (网络版彩图)基于博弈方法优化运行的多微电网互联电力系统

Figure 6 (Color online) A multi-microgrid interconnected power system with optimized operation based on the game method.

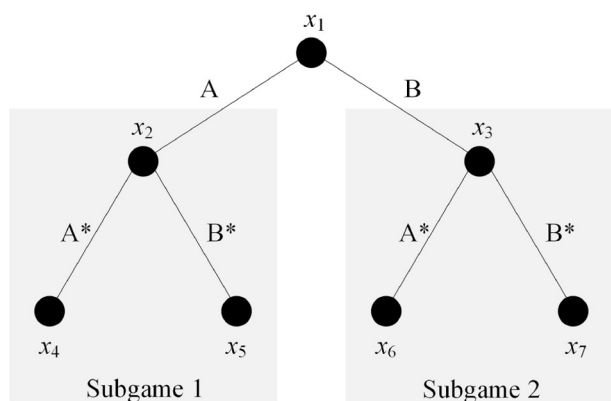


图 7 (网络版彩图)动态博弈中的序贯决策^[79]

Figure 7 (Color online) Sequential decision-making in dynamic games [79].

微分博弈是动态博弈的一种特殊形式,若动态博弈中各阶段的时间间隔趋于无穷小,即转变为微分博弈^[92,93]。具体而言,在微分博弈中,参与者的策略选择规律可由微分方程(组)刻画,故可用于分析连续动态下多主体的交互关系^[94~96]。

5.2 多群体运行优化方法

5.2.1 基于静态博弈理论的新能源多群体运行优化

静态合作博弈在多群体系统规划、调度、市场交易等方面得到广泛关注和应用,文献[97,98]基于合作博弈理论,构建了考虑电网在内的多群体(风/光新能源、储能系统等)联盟,以优化各群体的容量配置,避免无序扩张;文献[99]深入探究了多群体合作联盟内部的效益分配策略,以期实现系统规划问题中各群体效益的公平、合理分配;文献[100]面向多群体联盟多层次、多结构、多维度的特性,提出了基于合作博弈理论的新能源多群体分层协同优化架构,并提出协同优化调度策略;文献[101,102]针对多群体联盟内部的协商机制,研究了一种特殊的合作博弈问题——讨价还价博弈(bargaining game),通过机理分析和严格证明,阐述了不同群体之间或者群体自身不同目标之间的权衡关系,并结合帕累托前沿(Pareto front)给出了折中策略的求解方法;此外,文献[103]针对风电存在的波动性问题,在合作博弈框架下,动态调整新能源多群体的有功出力,实现群体间的协调互济,以平抑风电波动性影响;文献[104~106]则将合作博弈理论应用于电力市场的交易机制,为促进新能源消纳和电力

市场发展提供科学依据。

与合作博弈相对,新能源多群体在非合作博弈中不再具有“联盟协议”,群体与群体间存在竞争和对抗关系。文献[107]通过非合作博弈架构分析各群体的最优容量/发电量,群体效益计及发电/储能电池的全寿命周期费用、售电收入、系统供电可靠性等因素;文献[108~110]从发电侧的视角对新能源群体与群体、群体与电网之间的竞争关系进行深入的研究和阐述,并采用迭代搜索算法求解非合作博弈格局的Nash均衡;文献[111~113]从需求侧的视角分析售电侧改革大背景下^[114],多群体在多时间尺度交易中存在的复杂竞争博弈格局,分别从理论和算例验证上阐述了Nash均衡的存在性和优越性,从侧面说明了基于非合作博弈理论的运行管理方式对于发挥需求侧灵活调控潜力的重要意义。

5.2.2 基于动态博弈理论的新能源多群体运行优化

动态博弈的本质在于考虑了新能源群体决策的先后顺序。各群体可获取所有(或部分)群体的历史决策信息,并据此做出当前时刻的决策。通过构建“博弈树”,可计算博弈历史过程中的最优解,即子博弈精炼Nash均衡。文献[115,116]将多群体按照决策的先后顺序划分为“领导者”和“追随者”,通过动态定价机制协调供需平衡,提出迭代算法求解均衡,优化发电计划与用户需求响应,有效平抑负荷波动并降低供需缺口;文献[117]进一步细化,通过比例分配规则实现分布式能源交易,严格证明均衡存在性和唯一性,激励微电网优化售电策略与储能决策,提升能源利用效率;文献[118,119]则研究非合作斯塔克尔伯格博弈框架,设计分布式算法收敛至唯一均衡,结合共享备用能源机制抵御价格篡改攻击,兼顾市场收益最大化和电网可靠性;文献[120]则提出多领导者多追随者(multi-leader-multi-follower, MLMF)斯塔克尔伯格博弈模型,通过子模博弈理论证明均衡唯一性,并设计动态响应算法实现综合能源系统的最优交易。

综上所述,对上述研究现状系统性整理,现有基于博弈论的多群体运行优化方法如表3所示。

5.2.3 基于博弈理论的新能源多群体优化实例

博弈理论已在新能源多群体优化问题中广泛应用,并解决了工程中的实际问题^[121]。在国内,清华大学

表 3 新能源多群体博弈优化方法

Table 3 Game-based optimization methods for renewable energy groups

Research question	Decision target	Type of game	Reference
Power system planning	Capacity	Static cooperative game	[97–99]
		Static non-cooperative game	[107]
Power system dispatch optimization	Output	Static cooperative game	[100–103]
		Static non-cooperative game	[110–112]
		Dynamic game	[115,116]
Trading strategy under the market mechanism	Bidding strategy	Static cooperative game	[104–106]
		Static non-cooperative game	[108,109,113]
		Dynamic game	[117–120]

梅生伟教授团队基于合作博弈理论,研究了青海电网光伏开发布局最优方案,相比传统方案(在格尔木地区建设装机为3434 MW光伏电站),博弈理论指导下的方案(在乌兰县地区建设3265 MW光伏电站)不仅减少了4.92%的建设成本,还在一定程度上提高了光伏资源的利用率;此外,该团队基于微分博弈理论开发了发电机鲁棒调速和励磁控制装置^[122],应用于东北地区发电厂,保障了该地区电网运行的安全稳定性. 在国外,博弈理论被广泛引用于电力市场交易^[123],例如欧洲微电网试点项目(European pilot microgrid)通过缔结居民家庭和工商业用户“合作联盟”,以达成“对等交易”(peer to peer trading),有效提高了光伏消纳率;北美微电网测试平台(North American testbed)基于博弈理论调度热水器等灵活性负荷,平抑微电网发电侧新能源的波动性,有效降低了弃风弃光率,同时确保了微电网内部频率稳定.

5.3 现状总结及问题

综合研究现状可见,现有基于传统静态博弈、动态(序贯)博弈理论的新能源多群体规划和运行优化方法,多聚焦于长时间尺度的容量配置、功率平衡约束下的稳点工作点调度以及市场价格激励下的竞价策略,其数学表征通常为代数方程或不等式约束. 此类方法通过传统代数博弈建模与均衡分析,能够有效解决多群体在稳态运行条件下的交互决策问题. 然而,新能源出力随机性与负荷时变性共同作用所引发的频率电压动态性能约束(常表征为微分方程或时变不等式),现有数学工具尚难以有效刻画,导致对新型电力系统

实际运行中广泛存在的动静态稳定耦合问题缺乏系统性分析手段. 典型案例如高比例新能源电力市场中,新能源群体的静态竞价策略与动态调频调压响应形成时空多维交织的博弈关系,而静态的竞价调度结果对频率电压稳定裕度的潜在影响尚未纳入统一优化模型.

6 新能源系统智能调控架构展望与讨论

由于面向传统电力系统的“自上而下”控制架构难以满足新能源系统海量异构个体精细化调控的需求,可考虑基于“自下而上”理念设计分层式智能调控架构. 在本文所构建的智能调控体系中,分别通过个体同步实现装备稳定运行,通过群体协同实现场站内/场站间频率/电压支撑,通过多群体博弈实现系统运行优化. 然而,当前同步控制面临频率电压耦合及复杂异构电网结构未知难题,协同支撑面临群体频率电压多维度交互、跨时空耦合难题,博弈优化研究面临多群体动静态稳定耦合难题. 为解决上述难题,本章节将从装备同步理论与稳定控制、群体协同理论与频率/电压支撑以及多群体博弈理论与运行优化等方面提出可能的解决方案,展望未来发展方向.

6.1 装备同步理论与稳定控制展望

针对海量新能源多点并入复杂电网下装备同步稳定运行挑战,未来研究亟需聚焦经网络互联的异构新能源装备广义同步机制及稳定控制方法. 现有研究表明,复频率方法是破解复杂电网连接下频率-电压耦合

的海量新能源系统暂态同步稳定难题的极具发展潜力的方案. 因此, 可考虑基于复频率方法探索电网结构未知时异构新能源装备同步策略, 以保证系统稳定运行. 在理论层面, 首先应分别分析跟/构网型新能源装备的频率-电压耦合机制, 建立常见跟/构网型新能源装备的复频率模型, 攻克异构新能源装备频率-电压耦合机制建模难题, 并在复频率坐标下重构电网阻抗、阻尼、惯量等电网特征的定义, 基于重构的阻抗、阻尼、惯量定义建立含其他异构新能源装备的电网简化模型, 结合装备模型和电网模型研究新能源装备广义同步稳定分析方法, 揭示不同电网特征下异构新能源装备同步机理, 突破海量异构新能源经复杂电网互联下装备复频率同步理论. 在控制层面, 可考虑通过复杂电网关键电气量测量, 辨识电网阻抗、阻尼、惯量等特征, 匹配电网特征与异构装备同步机理, 针对不同电网特征设计基于相应机理的新能源装备同步稳定控制策略, 并根据电网情况实时调整控制策略, 突破电网特征自适应的装备同步控制技术, 实现异构新能源装备在任意电网条件下的广义同步稳定运行.

6.2 群体协同理论与频率/电压支撑展望

针对新能源规模化接入所带来的频率与电压安全稳定挑战, 未来研究亟需聚焦频率电压时空多维耦合机制以及分布式协同控制, 构建面向海量、时变、多样化新能源装备群体的频率/电压协同支撑理论与方法体系. 首先, 应建立新能源群体的网络化系统模型, 提出反映其整体频率与电压响应特性的集总指标, 量化表征系统层面的控制目标. 在此基础上, 构建面向装备层级的分布式支撑指标, 用于刻画单体装备在动态与稳态过程中的频率、电压支撑能力, 为不同类型装备、不同场站或区域间的协同控制提供理论依据. 其次, 需明确群体集总指标与装备分布式指标之间的定量关系, 从而制定新能源群体频率/电压响应的分布式规范, 进一步推动新能源频率电压响应特性的下一代电网导则制定, 形成支持新型电力系统运行的标准与导则体系. 最后, 在控制架构层面, 基于分布式支撑指标, 动态感知各装备的支撑能力(如等效惯量裕度、无功调节潜力等), 通过分布式协同控制策略, 实现装备间的实时信息交互与资源动态优化, 构建具备自适应调节能力的协同控制机制, 显著提升电网整体的频

率电压抗扰动能力. 通过上述理论方法体系的构建与技术突破, 有望实现新能源装备从“被动适应”向“主动支撑”的范式转变, 为高比例新能源电力系统的安全稳定运行提供核心支撑与技术路径.

6.3 多群体博弈理论与运行优化展望

鉴于对现有研究的梳理, 当前多群体博弈优化方法面临两大核心瓶颈: 其一, 频率电压动态稳定约束与静态功率平衡约束的跨尺度协调机制尚未明晰, 导致难以对新能源多群体动态交互特性精确建模; 其二, 传统博弈均衡分析框架无法有效融合微分代数方程刻画的机电暂态过程与时变不等式约束, 致使静态调度与动态稳定控制产生策略失配, 显著增大系统失稳风险. 为此, 未来亟待建立新能源多群体动态博弈的全新理论体系, 突破动态稳定约束下新能源多群体博弈建模难题, 融合多群体功率平衡静态约束与频率电压动态稳定约束, 解析多群体交互对系统闭环稳定性、动静态响应特性及技术经济效益的耦合影响; 研究新能源多群体的反馈均衡优化策略, 揭示动态稳定约束下新能源多群体博弈均衡的存在性与最优性, 提出机理-数据驱动的博弈均衡求解方法.

6.4 新能源系统人工智能与动态感知展望

新能源系统的调控不仅需从“个体-群体-多群体”三层进行能量流的逐层调控, 还需通过智能化手段为能量流的控制提供信息流支撑. 在新能源系统“同步-协同-博弈”分层式智能调控架构中, 根据电网关键电气量测量实时感知电网特征为一大关键难题. 而海量新能源并网给系统带来了巨大数据量和计算难度, 难以直接基于物理机理建立复杂电网模型并提取电网特征, 亟需探索基于人工智能的电网特征提取方法. 为实现复杂电网的特征实时提取, 未来可考虑基于电网历史运行数据及仿真数据训练构建能源大模型, “个体-群体-多群体”三层级关键电气量在能源大模型中交互实现全局信息共享, 从而获取各层级关键电网特征, 为建立“同步-协同-博弈”控制架构提供电网信息支撑, 提升新能源系统分层式智能调控的灵活性.

6.5 新能源系统智能调控架构的应用讨论

在实际高比例新能源电力系统中, 不仅有海量新

能源,还存在发电厂、用电负荷等其他部分.传统发电及用电装备特性对新能源系统调控的影响不可忽略.

(1) 在同步层面,新能源既需要与电网中其他新能源同步,也需要与发电厂、可调负荷等源、荷同步,因此,可将发电厂与可调负荷纳入所提新能源系统的同步控制架构,通过辨识含发电厂、用电负荷和新能源的复杂电网的特征,根据电网特征自适应调节新能源与可调负荷的同步控制策略,以保障复杂系统的同步稳定运行;(2) 在协同层面,发电厂与可调负荷等也可共同参与新能源系统的协同控制,同样通过辨识复杂电网特征,确定所需满足的群体集总支撑指标及装备分布式指标,从而自适应调节系统中新能源场站及可调负荷群的协同策略,以实现电网频率/电压支撑;(3) 在博弈层面,则需全面考虑多群体中发电厂、新能源的输出功率动态与用电负荷的平衡关系,以及不同电源的发电成本和不同负荷的用电价格,以实现复杂系统的高效运行.在上述三个层面中,新能源与可调负荷的控制均需充分考虑电网中发电厂与用电负荷的特性,从而保证系统整体目标一致.

在控制实施的过程中,尤为值得注意的是,各层级控制均在下一层控制效果得以顺利实现的范围内进行设计,以避免各层级控制出现矛盾冲突.例如,发电机组、负荷、新能源装备等个体均需首先满足同步稳定运行的要求,在满足个体同步稳定的范围内发电厂、负荷群、新能源场站等群体进行频率/电压协同支撑,又在群体频率/电压支撑能力范围内多群体进行博弈优化,以这种逐层为上一层提供约束的方式进行控制设计,可使得系统在最大化个体自由度的同时满足各层约束条件,从而保障系统安全高效运行.

7 总结

传统发电系统中,同步发电机组通过集中式数据分析与通信,采用“自上而下”的分层调控维持系统安全运行.然而,在新能源系统中,新能源特性极为复杂,传统“自上而下”的控制架构难以实现个体的精细化调控,因此,本文类比人类社会治理架构提出了“自下而上”分层式智能调控架构,即“个体同步-群体协同-多群体博弈”的控制架构.基于当前同步、协同、博弈理论的综述,讨论了新能源系统在装备稳定控制、群体频率/电压支撑以及多群体运行优化等方面亟需突破的

难点,为含高比例新能源电力系统的调控厘清未来发展方向:

(1) 在个体同步层面,当前常规同步稳定控制忽略网络的复杂连接与频率电压的耦合特性,通过控制参数优化与控制结构改善,保障新能源装备与电网的频率同步;而广义同步稳定控制则是在考虑复杂电力网络连接与频率-电压多变量耦合的前提下,通过设计考虑多变量耦合的控制策略,实现通过电力网络互联的新能源装备的频率同步及电压稳定.然而,在网络结构未知、新能源控制多样的实际运行场景中,当前同步稳定控制均不再适用,通过构建新能源装备复频率同步理论,并基于电网特性自适应调节新能源装备复频率是可行方案,有助于实现装备与电网的广义同步稳定运行.

(2) 在群体协同层面,集中式频率/电压支撑主要面向个体数量不多且功率特性平稳的传统发电装备,无法适应海量、时变、多样新能源装备的功率调控需求,也难以计及新能源装备在时间、空间及频率电压多维度上的耦合特性;而当前分布式协同控制主要面向二次控制,尚未扩展应用至新能源群体频率电压支撑中.通过建立群体分布式协同理论体系,并基于实时信息交互与动态资源优化实现新能源装备的自适应协同控制,是破解新型电力系统频率电压稳定难题的有效路径,有助于构建新能源群体主动支撑体系,保障系统的频率电压稳定运行.

(3) 在多群体博弈层面,现有研究围绕电力系统规划与运行的时序差异性特征,构建了基于静态/动态博弈的优化框架,通过协调容量配置、运行调度与市场竞价策略,有效抑制新能源集群无序扩张,为提升消纳效率与市场机制设计提供理论支撑.然而,高比例新能源渗透场景下系统动态稳定性问题日趋凸显,传统基于稳态工作点的博弈优化范式面临显著局限.因此,需建立动态稳定约束与静态功率平衡的多时间尺度协同优化机制,并发展机理-数据驱动融合的混合智能求解方法,此为多能源集群动态互补与高效运行的可行途径.

综上,新能源系统的调控需从个体同步、群体协同及多群体博弈三个层面进行综合控制,形成整体协调、层次分明且稳定性强的新能源智能调控体系,为新能源系统稳定并网、快速支撑与高效消纳提供有力保障.

参考文献

- 1 Central People's Government of the People's Republic of China. New energy power generation installed capacity surpasses coal power for the first time and grid-connected solar power installed capacity reaches 710 million kW (in Chinese). 2024. https://www.gov.cn/yaowen/liebiao/202407/content_6964172.htm [中华人民共和国中央人民政府. 新能源发电装机规模首超煤电并网太阳能发电装机容量达7.1亿千瓦. 2024. https://www.gov.cn/yaowen/liebiao/202407/content_6964172.htm]
- 2 China Southern Power Grid Co., Ltd. Digital grid promoting the construction of a new power system with renewable energy as the main body (White paper) (in Chinese). 2021. <http://www.chinasmartgrid.com.cn/news/20210425/638462-2.shtml> [中国南方电网有限责任公司. 数字电网推动构建以新能源为主体的新型电力系统白皮书. 2021. <http://www.chinasmartgrid.com.cn/news/20210425/638462-2.shtml>]
- 3 Xin B A, Guo M Q, Wang S W, et al. Friendly HVDC transmission technologies for large-scale renewable energy and their engineering practice (in Chinese). *Autom Power Syst*, 2021, 45: 1–8 [辛保安, 郭铭群, 王绍武, 等. 适应大规模新能源友好送出的直流输电技术与工程实践. *电力系统自动化*, 2021, 45: 1–8]
- 4 Luo A, He Z X, Chen Y D, et al. Research on technology and innovation of high efficiency and high quality conversion of electric energy (in Chinese). *Proc Chin Soc Electr Eng*, 2024, 44: 6910–6920 [罗安, 何志兴, 陈燕东, 等. 电能高效高质转化技术与创新. *中国电机工程学报*, 2024, 44: 6910–6920]
- 5 Xin B A, Li M J, He J B, et al. Research on security defense system of new power system (in Chinese). *Proc Chin Soc Electr Eng*, 2023, 43: 5723–5732 [辛保安, 李明节, 贺静波, 等. 新型电力系统安全防御体系探究. *中国电机工程学报*, 2023, 43: 5723–5732]
- 6 Yuan X M, Zhang M Q, Chi Y N, et al. Basic challenges of and technical roadmap to power-electricized power system dynamics issues (in Chinese). *Proc Chin Soc Electr Eng*, 2022, 42: 1904–1917 [袁小明, 张美清, 迟永宁, 等. 电力电子化电力系统动态问题的基本挑战和技术路线. *中国电机工程学报*, 2022, 42: 1904–1917]
- 7 Yang Z, Yi H, Zhuo F, et al. A system-level harmonic control method based on multibus voltage detected APF without exact phase synchronization. *IEEE J Emerg Sel Top Power Electron*, 2023, 11: 2618–2631
- 8 Zhou J H, Li J. Comparison and analysis of China and overseas technical standards for grid-forming energy storage conversion system (in Chinese). *Autom Power Syst*, 2025, 11: 14–28 [周京华, 李津. 构网型储能变流器国内外技术标准对比与分析. *电力系统自动化*, 2025, 11: 14–28]
- 9 Wang Q S, Yang M, Li P, et al. Robust look-ahead dispatch of electricity-heat integrated energy system considering the flexibility recovery period of heating networks (in Chinese). *High Voltage Eng*, 2023, 49: 3173–3186 [王秋实, 杨明, 李鹏, 等. 计及热网灵活性恢复过程的热电综合能源系统鲁棒超前调度. *高电压技术*, 2023, 49: 3173–3186]
- 10 Zhang Z Q, Xin C S, Lü P, et al. Transient voltage analysis of ± 800 kV Tian-Zhong DC monopole lockout fault near-end grid (in Chinese). *Sichuan Electr Power Technol*, 2016, 39: 58–61 [张增强, 辛超山, 吕盼, 等. ± 800 kV天中直流单极闭锁故障近区电网暂态电压分析. *四川电力技术*, 2016, 39: 58–61]
- 11 Ma N N, Xie X R, Tang J, et al. Wide-area monitoring and early warning system for broadband oscillations in “dual-high” power systems (in Chinese). *J Tsinghua Univ (Sci Technol)*, 2021, 61: 457–464 [马宁宁, 谢小荣, 唐健, 等. “双高”电力系统宽频振荡广域监测与预警系统. *清华大学学报(自然科学版)*, 2021, 61: 457–464]
- 12 Liu J L, Cao N, Qian F, et al. Analysis of unit oscillation in wind farm considering control parameters of converter for DFIG-based wind turbine (in Chinese). *Autom Power Syst*, 2021, 45: 42–49 [刘俊磊, 曹娜, 钱峰, 等. 考虑双馈风电机组变流器控制参数的风电场内机组振荡分析. *电力系统自动化*, 2021, 45: 42–49]
- 13 Sun H D, Xu T, Guo Q, et al. Analysis on blackout in Great Britain power grid on August 9th, 2019 and its enlightenment to power grid in China (in Chinese). *Proc Chin Soc Electr Eng*, 2019, 39: 6183–6192 [孙华东, 许涛, 郭强, 等. 英国“8·9”大停电事故分析及对中国电网的启示. *中国电机工程学报*, 2019, 39: 6183–6192]
- 14 North American Electric Reliability Corporation and Texas RE. Odessa disturbance. 2021. https://www.nerc.com/pa/rrm/ea/Documents/Odessa_Disturbance_Report.pdf
- 15 Barr J, Majumder R. Integration of distributed generation in the Volt/VAR management system for active distribution networks. *IEEE Trans Smart Grid*, 2015, 6: 576–586
- 16 Valizadeh Haghi H, Qu Z. A kernel-based predictive model of EV capacity for distributed voltage control and demand response. *IEEE Trans*

Smart Grid, 2018, 9: 3180–3190

- 17 Le J, Zhou Q, Wang C, et al. Research on voltage and power optimal control strategy of distribution network based on distributed collaborative principle (in Chinese). *Proc Chin Soc Electr Eng*, 2020, 40: 1249–1257 [乐健, 周谦, 王曹, 等. 基于分布式协同的配电网电压和功率优化控制方法研究. *中国电机工程学报*, 2020, 40: 1249–1257]
- 18 Hu J D, Liu S, Shen G, et al. Distributed model predictive control strategy of reactive power response for charging piles based on peer-to-peer communication (in Chinese). *Autom Power Syst*, 2022, 46: 25–35 [胡金迪, 刘思, 沈广, 等. 基于端对端通信的充电桩无功响应分布式模型预测控制策略. *电力系统自动化*, 2022, 46: 25–35]
- 19 Yu M, Wang J, Yan J, et al. Pricing information in smart grids: A quality-based data valuation paradigm. *IEEE Trans Smart Grid*, 2022, 13: 3735–3747
- 20 Wei Z X, Sun Y, Hou X C, et al. A fully self-synchronized control for hybrid series-parallel electronized power networks.. arXiv: [2503.00943](https://arxiv.org/abs/2503.00943)
- 21 Li M, Geng H, Zhang X. Distributed coordinated control for stabilization of multi-inverter power plant. *IEEE Trans Ind Electron*, 2023, 70: 12421–12430
- 22 Agarwal A, Simpson-Porco J W, Pavel L. Game-theoretic feedback-based optimization. *IFAC-PapersOnLine*, 2022, 55: 174–179
- 23 Li P, Xu W C, Ding M S, et al. Collaborative optimal scheduling of the multi-park integrated energy systems based on matrix semi-tensor product and cooperative game theory (in Chinese). *Proceed CSEE*, 2025, 45: 2605–2616 [李鹏, 徐伟成, 丁茂生, 等. 基于合作博弈与矩阵半张量积的多园区综合能源系统协同优化运行方法. *中国电机工程学报*, 2025, 45: 2605–2616]
- 24 Geng H, He C J, Liu Y S, et al. Overview on transient synchronization stability of renewable-rich power systems (in Chinese). *High Voltage Eng*, 2022, 48: 3367–3383 [耿华, 何长军, 刘浴霜, 等. 新能源电力系统的暂态同步稳定研究综述. *高电压技术*, 2022, 48: 3367–3383]
- 25 Zhang Y, Zhang C, Cai X, et al. Transient grid-synchronization stability analysis of grid-tied voltage source converters: stability region estimation and stabilization control (in Chinese). *Proc Chin Soc Electr Eng*, 2022, 42: 7871–7884 [张宇, 张琛, 蔡旭, 等. 并网变换器的暂态同步稳定性分析: 稳定域估计与镇定控制. *中国电机工程学报*, 2022, 42: 7871–7884]
- 26 Kabalan M, Singh P, Niebur D. Nonlinear Lyapunov stability analysis of seven models of a DC/AC droop controlled inverter connected to an infinite bus. *IEEE Trans Smart Grid*, 2019, 10: 772–781
- 27 Tian Z, Tang Y, Zha X, et al. Hamilton-based stability criterion and attraction region estimation for grid-tied inverters under large-signal disturbances. *IEEE J Emerg Sel Top Power Electron*, 2022, 10: 413–423
- 28 Fu X K, Huang M, Ling Y J, et al. Transient synchronization stability analysis of grid-forming converter influenced by power-coupling and current-limiting (in Chinese). *Proc Chin Soc Electr Eng*, 2024, 44: 2815–2824 [付熙坤, 黄萌, 凌扬坚, 等. 功率耦合和电流限幅影响下构网型变流器的暂态同步稳定分析. *中国电机工程学报*, 2024, 44: 2815–2824]
- 29 Xiong L, Zhuo F, Wang F, et al. Static synchronous generator model: A new perspective to investigate dynamic characteristics and stability issues of grid-tied PWM inverter. *IEEE Trans Power Electron*, 2016, 31: 6264–6280
- 30 Luo C, Ma X, Liu T, et al. Controller-saturation-based transient stability enhancement for grid-forming inverters. *IEEE Trans Power Electron*, 2023, 38: 2646–2657
- 31 Wang B C, Zhang X Y, Qi L, et al. Transient-stability-based power climbing control of grid-forming inverters. In: *Proceedings of the 2022 IEEE International Power Electronics and Application Conference and Exposition (PEAC)*. Guangzhou, 2022
- 32 Zhang Y, Cai X, Zhang C, et al. Transient synchronization stability analysis of voltage source converters: A review (in Chinese). *Proc Chin Soc Electr Eng*, 2021, 41: 1687–1701 [张宇, 蔡旭, 张琛, 等. 并网变换器的暂态同步稳定性研究综述. *中国电机工程学报*, 2021, 41: 1687–1701]
- 33 Wu H, Wang X. Design-oriented transient stability analysis of PLL-synchronized voltage-source converters. *IEEE Trans Power Electron*, 2020, 35: 3573–3589
- 34 Taul M G, Wang X F, Davari P, et al. Systematic approach for transient stability evaluation of grid-tied converters during power system faults. In: *Proceedings of the 2019 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition*. Baltimore, 2019. 5191–5198
- 35 Wu H, Wang X. Design-oriented transient stability analysis of grid-connected converters with power synchronization control. *IEEE Trans Ind Electron*, 2019, 66: 6473–6482
- 36 Ma R, Li J, Kurths J, et al. Generalized swing equation and transient synchronous stability with PLL-based VSC. *IEEE Trans Energy Convers*, 2022, 37: 1428–1441
- 37 Hu Q, Fu L, Ma F, et al. Large signal synchronizing instability of PLL-based VSC connected to weak AC grid. *IEEE Trans Power Syst*, 2019, 34: 3220–3229

- 38 Zhao J, Huang M, Yan H, et al. Nonlinear and transient stability analysis of phase-locked loops in grid-connected converters. *IEEE Trans Power Electron*, 2021, 36: 1018–1029
- 39 Zhao J, Huang M, Zha X. Nonlinear analysis of PLL damping characteristics in weak-grid-tied inverters. *IEEE Trans Circuits Syst II*, 2020, 67: 2752–2756
- 40 Yang P. Theory and distributed analysis methods for power system stability based on strong synchronization (in Chinese). Dissertation for Doctoral Degree. Beijing: Tsinghua University, 2022 [杨鹏. 基于强同步的电力系统稳定性理论与分布式分析方法. 博士学位论文. 北京: 清华大学, 2022]
- 41 Bao J, Lee P L. Process Control: The Passive Systems Approach. London: Springer, 2019
- 42 Milano F. Complex frequency. *IEEE Trans Power Syst*, 2022, 37: 1230–1240
- 43 He X, Häberle V, Dörfler F. Complex-frequency synchronization of converter-based power systems. *IEEE Trans Control Netw Syst*, 2025, 12: 787–799
- 44 He X, Dörfler F. Passivity and decentralized stability conditions for grid-forming converters. *IEEE Trans Power Syst*, 2024, 39: 5447–5450
- 45 He X, Häberle V, Subotić I, et al. Nonlinear stability of complex droop control in converter-based power systems. *IEEE Control Syst Lett*, 2023, 7: 1327–1332
- 46 He X, Huang L, Subotić I, et al. Quantitative stability conditions for grid-forming converters with complex droop control. *IEEE Trans Power Electron*, 2024, 39: 10834–10852
- 47 Li Y, Xin Q M, Yang Z Q, et al. Stability issues and control methods for large-scale renewable energy island transmission systems via VSC-HVDC (in Chinese). *High Voltage Eng*, 2025: 1–13 [李岩, 辛清明, 杨子千, 等. 大规模新能源经柔性直流孤网送出系统的稳定新问题与控制方法. 高电压技术, 2025: 1–13]
- 48 Erlich I, Shewarega F, Engelhardt S, et al. Effect of wind turbine output current during faults on grid voltage and the transient stability of wind parks. In: Proceedings of the 2009 IEEE Power & Energy Society General Meeting. Calgary, 2009. 1–8
- 49 Cheng H, Shuai Z, Shen C, et al. Transient angle stability of paralleled synchronous and virtual synchronous generators in islanded microgrids. *IEEE Trans Power Electron*, 2020, 35: 8751–8765
- 50 Pan D, Wang X, Liu F, et al. Transient stability of voltage-source converters with grid-forming control: a design-oriented study. *IEEE J Emerg Sel Top Power Electron*, 2020, 8: 1019–1033
- 51 Lü Y S, Zou Z Y, Wu C, et al. Analysis of synchronization stability of the normalization PLL based on low-pass filter (in Chinese). *High Voltage Eng*, 2022, 48: 3848–3858 [吕雅诗, 邹赵悦, 吴超, 等. 基于低通滤波器的标么化锁相环同步稳定性分析. 高电压技术, 2022, 48: 3848–3858]
- 52 Jiang W T, Hu P F, Yin R, et al. Transient stability analysis and hybrid synchronization control strategy of converter based on virtual synchronous generator (in Chinese). *Autom Power Syst*, 2021, 45: 124–133 [姜卫同, 胡鹏飞, 尹瑞, 等. 基于虚拟同步机的变流器暂态稳定分析及混合同步控制策略. 电力系统自动化, 2021, 45: 124–133]
- 53 Pan D H, Wang X F, Liu F C, et al. Transient stability impact of reactive power control on grid-connected converters. In: Proceedings of the 2019 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE). Baltimore, 2019. 4311–4316
- 54 Ma S K, Geng H, Liu L, et al. Grid-synchronization stability improvement of large scale wind farm during severe grid fault. *IEEE Trans Power Syst*, 2017, 33: 216–226
- 55 Huang L, Xin H, Wang Z, et al. Transient stability analysis and control design of droop-controlled voltage source converters considering current limitation. *IEEE Trans Smart Grid*, 2019, 10: 578–591
- 56 Huang L B, Zhang L Q, Xin H H, et al. Mechanism analysis of virtual power angle stability in droop-controlled inverters (in Chinese). *Autom Power Syst*, 2016, 40: 117–123 [黄林彬, 章雷其, 辛焕海, 等. 下垂控制逆变器的虚拟功角稳定机理分析. 电力系统自动化, 2016, 40: 117–123]
- 57 Zhao F, Shuai Z K, Peng Y L, et al. Evaluation method for transient stability of inverter containing current limiter (in Chinese). *Proc Chin Soc Electr Eng*, 2021, 41: 2245–2254 [赵峰, 帅智康, 彭也伦, 等. 含电流限幅器的逆变器暂态稳定性评估方法. 中国电机工程学报, 2021, 41: 2245–2254]
- 58 Domingo-Enrich R, He X Q, Häberle V, et al. Dynamic complex-frequency control of grid-forming converters. In: Proceedings of the 2024 IECON 50th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society. Chicago, 2024. 1–6
- 59 Huang H, Ju P, Jin Y, et al. Generic system frequency response model for power grids with different generations. *IEEE Access*, 2020, 8: 14314–

14321

- 60 Shang L, Hua Z H, Liu C X, et al. Modelling and analysis of grid frequency dynamics with equivalent inertia characteristic of grid-forming voltage-source converters. *CSEE J Power Energy Syst*, 2024, 99: 1–13
- 61 Pates R, Mallada E. Robust scale-free synthesis for frequency control in power systems. *IEEE Trans Control Netw Syst*, 2019, 6: 1174–1184
- 62 Jiang Y, Pates R, Mallada E. Dynamic droop control in low-inertia power systems. *IEEE Trans Automat Contr*, 2020, 66: 3518–3533
- 63 Dörfler F, Bullo F. Kron reduction of graphs with applications to electrical networks. *IEEE Trans Circuits Syst I*, 2012, 60: 150–163
- 64 Liu C, Xin H, Wu D, et al. Generalized operational short-circuit ratio for grid strength assessment in power systems with high renewable penetration. *IEEE Trans Power Syst*, 2024, 39: 5479–5494
- 65 Zhou Y H, Xin H H, Ju P. System strength quantification principle and method of multi-infeed systems based on generalized short-circuit ratio: Reviews, discussions and outlooks (in Chinese). *Proc Chin Soc Electr Eng*, 2023, 43: 3794–3810 [周瑀涵, 辛焕海, 鞠平. 基于广义短路比的多馈入系统强度量化原理与方法: 回顾、探讨与展望. *中国电机工程学报*, 2023, 43: 3794–3810]
- 66 Gao H, Xin H, Huang L, et al. Common-mode frequency in converter-integrated power systems: Definition, analysis, and quantitative evaluation. *IEEE Trans Power Syst*, 2022, 37: 4846–4860
- 67 Zhuang K H, Xin H H, Häberle V, et al. Quantifying grid-forming behavior: Bridging device-level dynamics and system-level stability, arXiv: 2503.24152
- 68 Häberle V, Fisher M W, Prieto-Araujo E, et al. Control design of dynamic virtual power plants: An adaptive divide-and-conquer approach. *IEEE Trans Power Syst*, 2022, 37: 4040–4053
- 69 Häberle V, Tayyebi A, He X, et al. Grid-forming and spatially distributed control design of dynamic virtual power plants. *IEEE Trans Smart Grid*, 2024, 15: 1761–1777
- 70 Xu Z. Reasonable definition and calculation method of grid strength under the background of new-type power systems (in Chinese). *High Voltage Eng*, 2022, 48: 3805–3819 [徐政. 新型电力系统背景下电网强度的合理定义及其计算方法. *高电压技术*, 2022, 48: 3805–3819]
- 71 Li G Q, Liu X C, Xin Y C, et al. Research on frequency stability of power system with high penetration renewable energy: A review (in Chinese). *High Voltage Eng*, 2024, 50: 1165–1181 [李国庆, 刘先超, 辛业春, 等. 含高比例新能源的电力系统频率稳定研究综述. *高电压技术*, 2024, 50: 1165–1181]
- 72 Dreidy M, Mokhlis H, Mekhilef S. Inertia response and frequency control techniques for renewable energy sources: A review. *Renew Sustain Energy Rev*, 2017, 69: 144–155
- 73 Häberle V, He X Q, Huang L B, et al. Quantitative decentralized stability certificates for grid-forming converter control, arXiv: 2503.05403
- 74 Häberle V, He X, Huang L, et al. Optimal dynamic ancillary services provision based on local power grid perception. *IEEE Trans Power Syst*, 2025, 40: 1816–1831
- 75 Huang L, Xin H, Dörfler F. H_∞ -control of grid-connected converters: Design, objectives and decentralized stability certificates. *IEEE Trans Smart Grid*, 2020, 11: 3805–3816
- 76 Zhao T, Parisio A, Milanovic J V. Distributed control of battery energy storage systems for improved frequency regulation. *IEEE Trans Power Syst*, 2020, 35: 3729–3738
- 77 Molzahn D K, Dörfler F, Sandberg H, et al. A survey of distributed optimization and control algorithms for electric power systems. *IEEE Trans Smart Grid*, 2017, 8: 2941–2962
- 78 Teng X L, Tan C, Chang L, et al. Review and prospect of research on active power and frequency control in power system with high proportion of renewable energy (in Chinese). *Autom Power Syst*, 2023, 47: 12–35 [滕贤亮, 谈超, 昌力, 等. 高比例新能源电力系统有功功率与频率控制研究综述及展望. *电力系统自动化*, 2023, 47: 12–35]
- 79 Mei S W, Wei W, Liu F, et al. Engineering Game Theory (in Chinese). Beijing: Tsinghua University Press, 2022 [梅生伟, 魏韡, 刘锋, 等. 工程博弈论. 北京: 清华大学出版社, 2022]
- 80 Lu Q, Chen L J, Mei S W. Typical applications and prospects of game theory in power systems (in Chinese). *Proc Chin Soc Electr Eng*, 2014, 34: 5009–5017 [卢强, 陈来军, 梅生伟. 博弈论在电力系统中典型应用及若干展望. *中国电机工程学报*, 2014, 34: 5009–5017]
- 81 Mei S, Wei W, Liu F. On engineering game theory with its application in power systems. *Control Theor Technol*, 2017, 15: 1–12
- 82 Tushar W, Saha T K, Yuen C, et al. A motivational game-theoretic approach for peer-to-peer energy trading in the smart grid. *Appl Energy*, 2019, 243: 10–20
- 83 Mei S, Li R, Xue X, et al. Paving the way to smart micro energy grid: Concepts, design principles, and engineering practices. *CSEE JPES*, 2017,

- 3: 440–449
- 84 Mei S W, Wang Y Y, Liu F, et al. Game approaches for hybrid power system planning. *IEEE Trans Sustain Energy*, 2012, 3: 506–517
- 85 Churkin A, Bialek J, Pozo D, et al. Review of cooperative game theory applications in power system expansion planning. *Renew Sustain Energy Rev*, 2021, 145: 111056
- 86 Kamishiro Y. New approaches to cooperative game theory: Core and value. Dissertation for Doctoral Degree. Providence: Brown University, 2010
- 87 Branzei R, Dimitrov D, Tijs S. Models in Cooperative Game Theory. New York: Springer Science & Business Media, 2008
- 88 Dong B M, Wang Y T, Guo G X. Cooperative Game Theory (in Chinese). Beijing: China Market Press, 2008 [董保民, 王运通, 郭桂霞. 合作博弈论. 北京: 中国市场出版社, 2008]
- 89 Nash Jr. J F. Equilibrium points in n -person games. *Proc Natl Acad Sci USA*, 1950, 36: 48–49
- 90 Nash J F. Non-cooperative games. In: The Foundations of Price Theory, Vol. 4. London: Routledge, 2024. 329–340
- 91 Bellman R. Dynamic programming. *Science*, 1966, 153: 34–37
- 92 Tan F X, Liu D R, Guan X P, et al. Review and perspective of nonlinear systems control based on differential games (in Chinese). *Automatica Sinica*, 2014, 40: 1–15 [谭拂晓, 刘德荣, 关新平, 等. 基于微分对策理论的非线性控制回顾与展望. 自动化学报, 2014, 40: 1–15]
- 93 Başar T, Olsder G J. Dynamic Noncooperative Game Theory. Philadelphia: SIAM, 1998
- 94 Li D F. Differential Games and Their Applications (in Chinese). Beijing: National Defense Industry Press, 2000 [李登峰. 微分对策及其应用. 北京: 国防工业出版社, 2000]
- 95 Zhang S Y. Differential Games (in Chinese). Beijing: Science Press, 1987 [张嗣瀛. 微分对策. 北京: 科学出版社, 1987]
- 96 Gao H W, Petrovskic A. Dynamic Cooperative Games (in Chinese). Beijing: Science Press, 2009 [高红伟, 彼得罗相. 动态合作博弈. 北京: 科学出版社, 2009]
- 97 Liu W X, Ling Y D, Zhao T Y. Cooperative game based capacity planning model for wind power in low carbon economy (in Chinese). *Autom Power Syst*, 2015, 39: 68–74 [刘文霞, 凌云岷, 赵天阳. 低碳经济下基于合作博弈的风电容量规划方法. 电力系统自动化, 2015, 39: 68–74]
- 98 Wang S D, Du W, Lin L, et al. Optimal allocation of photovoltaic energy storage microgrid under the demand side response based on cooperative game (in Chinese). *Power Syst Prot Control*, 2018, 46: 129–137 [王树东, 杜巍, 林莉, 等. 基于合作博弈的需求侧响应下光储微电网优化配置. 电力系统保护与控制, 2018, 46: 129–137]
- 99 Wu Q, Ren H, Gao W, et al. Benefit allocation for distributed energy network participants applying game theory based solutions. *Energy*, 2017, 119: 384–391
- 100 Zhong Y J, Li Y P, Hu B, et al. Hierarchical collaborative optimal scheduling of economy energy efficiency in energy internet based on cooperative game (in Chinese). *Power Autom Equip*, 2022, 42: 55–64 [钟永洁, 李玉平, 胡兵, 等. 基于合作博弈的能源互联网经济能效分层协同优化调度. 电力自动化设备, 2022, 42: 55–64]
- 101 Wei W, Liu F, Mei S. Nash bargain and complementarity approach based environmental/economic dispatch. *IEEE Trans Power Syst*, 2014, 30: 1548–1549
- 102 Wei W, Wang J, Mei S. Convexification of the Nash bargaining based environmental-economic dispatch. *IEEE Trans Power Syst*, 2016, 31: 5208–5209
- 103 Han X, Zhao Z, Li J, et al. Economic evaluation for wind power generation-hybrid energy storage system based on game theory. *Int J Energy Res*, 2017, 41: 49–62
- 104 He Y X, Song D, Xia T, et al. Mode of generation right trade between renewable energy and conventional energy based on cooperative game theory (in Chinese). *Power Syst Technol*, 2017, 41: 2485–2490 [何永秀, 宋栋, 夏天, 等. 基于合作博弈论的常规能源与新能源发电权置换交易模式研究. 电网技术, 2017, 41: 2485–2490]
- 105 Ma X F, Yu S Y, Zhu S J, et al. Profit allocation to virtual power plant members based on improved multifactor Shapley value method (in Chinese). *Trans Chin Electr Soc*, 2020, 35: 585–595 [麻秀范, 余思雨, 朱思嘉, 等. 基于多因素改进Shapley的虚拟电厂利润分配. 电工技术学报, 2020, 35: 585–595]
- 106 Dabbagh S R, Sheikh-El-Eslami M K. Risk-based profit allocation to DERs integrated with a virtual power plant using cooperative game theory. *Electric Power Syst Res*, 2015, 121: 368–378
- 107 Mei S W, Wang Y Y, Liu F. A game theory based planning model and analysis for hybrid power systems with wind generators-photovoltaic panels storage batteries (in Chinese). *Autom Power Syst*, 2011, 35: 13–19 [梅生伟, 王莹莹, 刘锋. 风—光—储混合电力系统的博弈论规划模

- 型与分析. 电力系统自动化, 2011, 35: 13–19]
- 108 Qiu G F, Yu X R, Jin L T, et al. Economic dispatching of regional power grid based on multi-virtual power plant game (in Chinese). *Proceed CSU-EPSA*, 2021, 33: 75–83 [邱革非, 余欣蓉, 金乐婷, 等. 多虚拟电厂博弈的区域电网经济调度. 电力系统及其自动化学报, 2021, 33: 75–83]
 - 109 Wang X, Zhang H J, Zhang S H. Game model of electricity market involving virtual power plant composed of wind power and electric vehicles (in Chinese). *Autom Power Syst*, 2019, 43: 155–162 [王琨, 张华君, 张少华. 风电和电动汽车组成虚拟电厂参与电力市场的博弈模型. 电力系统自动化, 2019, 43: 155–162]
 - 110 Sun G Q, Qian W H, Huang W J, et al. Optimal dispatch game model for virtual power plant considering security of distribution network (in Chinese). *Power Autom Equip*, 2019, 39: 7–14 [孙国强, 钱苇航, 黄文进, 等. 考虑配电网安全性的虚拟电厂优化调度博弈模型. 电力自动化设备, 2019, 39: 7–14]
 - 111 Liu X F, Gao B T, Luo J, et al. Non-cooperative game based hierarchical dispatch model of residential loads (in Chinese). *Autom Power Syst*, 2017, 41: 54–60 [刘晓峰, 高丙团, 罗京, 等. 基于非合作博弈的居民负荷分层调度模型. 电力系统自动化, 2017, 41: 54–60]
 - 112 Atzeni I, Ordonez L G, Scutari G, et al. Demand-side management via distributed energy generation and storage optimization. *IEEE Trans Smart Grid*, 2012, 4: 866–876
 - 113 Su W, Huang A Q. A game theoretic framework for a next-generation retail electricity market with high penetration of distributed residential electricity suppliers. *Appl Energy*, 2014, 119: 341–350
 - 114 The State Council of the People's Republic of China. Implementation opinions on promoting power retail reform (in Chinese). Beijing: State Council, 2015 [中华人民共和国国务院. 关于推进售电侧改革的实施意见. 北京, 2015]
 - 115 Chen L P, Pan Z N, Yu T, et al. Real-time optimal dispatch of large-scale electric vehicles based on dynamic non-cooperative game theory (in Chinese). *Autom Power Syst*, 2019, 43: 32–40+66 [陈吕鹏, 潘振宁, 余涛, 等. 基于动态非合作博弈的大规模电动汽车实时优化调度. 电力系统自动化, 2019, 43: 32–40+66]
 - 116 Yu M, Hong S H. Supply-demand balancing for power management in smart grid: A Stackelberg game approach. *Appl Energy*, 2016, 164: 702–710
 - 117 Lee J, Guo J, Choi J K, et al. Distributed energy trading in microgrids: A game-theoretic model and its equilibrium analysis. *IEEE Trans Ind Electron*, 2015, 62: 3524–3533
 - 118 Maharjan S, Zhu Q, Zhang Y, et al. Dependable demand response management in the smart grid: A Stackelberg game approach. *IEEE Trans Smart Grid*, 2013, 4: 120–132
 - 119 Mediawathe C P, Stephens E R, Smith D B, et al. Competitive energy trading framework for demand-side management in neighborhood area networks. *IEEE Trans Smart Grid*, 2017, 9: 4313–4322
 - 120 Wei F, Jing Z X, Wu P Z, et al. A Stackelberg game approach for multiple energies trading in integrated energy systems. *Appl Energy*, 2017, 200: 315–329
 - 121 Mei S W, Wei W, Liu F. Game theoretical perspective of power system control and decision making: A brief review of engineering game theory (in Chinese). *Control Theory Appl*, 2018, 35: 578–587 [梅生伟, 魏韡, 刘锋. 电力系统控制与决策中的博弈问题——工程博弈论初探. 控制理论与应用, 2018, 35: 578–587]
 - 122 Mei S, Wei W, Zheng S, et al. Development of an industrial non-linear robust power system stabiliser and its improved frequency-domain testing method. *IET Gener Transm Distrib*, 2011, 5: 1201–1210
 - 123 Cheng L, Yu F, Huang P, et al. Game-theoretic evolution in renewable energy systems: Advancing sustainable energy management and decision optimization in decentralized power markets. *Renew Sustain Energy Rev*, 2025, 217: 115776

Theories and methods of intelligent regulation and control in renewable energy systems

GENG Hua¹, LIU YuShuang², HE XiuQiang¹, ZHU Xiang¹ & HE ChangJun¹

¹ Department of Automation, Tsinghua University, Beijing 100084, China

² School of Electrical Engineering and Automation, Wuhan University, Wuhan 430000, China

With the rapid expansion of renewable energy integration, the operational security pressure on power systems has significantly increased. In the construction of modern power systems, the traditional top-down control architecture is difficult to ensure the stability of renewable energy systems. Consequently, developing bottom-up intelligent control architectures for renewable energy systems is crucial to grid security. Analogous to human civilization evolution, intelligent regulation and control of renewable energy systems need to address “synchronization-coordination-game” challenges from three levels: “individuals, groups, and multi-groups”. This paper systematically reviews present theoretical research and control technologies in three key aspects: synchronization theory and stability control for renewable energy equipment; coordinated theory and frequency/voltage support for renewable energy groups; game optimization theory and operation optimization for renewable energy multi-groups. The limitations of existing approaches are critically analyzed. Finally, potential future research directions are proposed to address current theoretical and technical gaps, offering innovative solutions and technical guidance for ensuring secure, stable, and efficient operation of future power systems with high renewable energy penetration.

renewable energy systems, intelligent regulation and control, synchronization, coordination, game theory

doi: [10.1360/SST-2025-0132](https://doi.org/10.1360/SST-2025-0132)