

新能源电力系统控制与优化

刘吉臻, 王 玮[†], 胡 阳, 刘敦楠, 李明扬

(华北电力大学 新能源电力系统国家重点实验室, 北京 102206)

摘要: 新能源电力的规模化开发以及传统能源的清洁高效利用已成为当前能源革命的主题. 目前, 我国新能源电力比例持续增加, 但受限于化石能源占主导的电源结构, 未来很长一段时间内我国将处于混合能源时代. 强随机波动性、间歇性以及不确定性使得规模化新能源电力的消纳问题日益严重, 我国弃风弃光现象十分突出. 深入认知电源侧、电网侧、负荷侧的基本特性, 着重解决其控制与优化难题, 是实现新能源电力系统安全高效运行的基本前提. 本文围绕电源效应、电网响应、负荷响应, 着重从电网友好型发电控制、基于多源互补的火力发电弹性控制、适应高比例新能源电力消纳的电网调度控制、需求侧资源特性与主动适应控制以及基于分布式能源的微电网控制5个方面阐述了新能源电力系统局部与全局控制中存在的科学问题.

关键词: 新能源电力系统; 控制; 优化

中图分类号: TP273 **文献标识码:** A

Control and optimization of alternate electrical power system with renewable energy sources

LIU Ji-zhen, WANG Wei[†], HU Yang, LIU Dun-nan, LI Ming-yang

(State Key Laboratory of Alternate Electrical Power System with Renewable Energy Sources,
North China Electric Power University, Beijing 102206, China)

Abstract: The wide development of renewable energy power, together with the clean and efficient utilization of traditional energy have become an important subject. In the forthcoming decades, China will stay at the mixed-energy period for a long time due to our energy structure. Although the renewable energy has a rapid development, the renewable energy power abandonment is very serious. To make a deep cognition on the characteristics of power, grid and load, and focus on solving their control and optimization problems, are the basic premise to operate the alternate electrical power system with renewable energy sources safely and efficiently. On the basis of power response, grid response and load response, the paper clarifies some key scientific problems on grid-friendly generation control, flexible control on coal-fired units based on multiple energy sources compensation, grid dispatch control based on renewable energy's integration, demand sources characteristics and active adaptive control, and micro-grid control based on distributed energy.

Key words: alternate electrical power system with renewable energy sources; control; optimization

1 引言(Introduction)

面对化石能源日益枯竭、环境污染、气候变化等人类共同的难题, 大力开发利用风能、太阳能、生物质能等新能源, 提升传统能源利用效率, 发展智能电网, 已成为世界各国的基本共识和应对策略. 在我国, 加快能源转型、实现绿色低碳发展也已上升为国家战略. 截至目前, 我国并网的风电装机与太阳能光伏发电装机均位居世界第一, 然而, 上网电量却与装机容量极不匹配, 弃风、弃光现象十分严重: 2015年, 全国弃风电量339亿千瓦时, 平均弃风率高达15%, 甘肃、新疆、

吉林等地区平均弃风率均超过了30%; 同年, 全国弃光电量(不含蒙西地区) 46.5亿千瓦时, 平均弃光率达到了12.62%; 从2016年上半年的趋势看, 弃风弃光在我国已呈愈演愈烈之势, 如何解决新能源电力的消纳难题已成为我国能源发展面临的首要问题.

从根源上看, 风能和太阳能作为一次能源不可储存, 其产生的电能具有随机性、间歇性和反调峰特性, 其规模化并入电网将会导致电力系统的运行调度控制变得困难, 这也是我国新能源电力消纳难题日益凸显的根本原因. 按照我国能源发展规划, 新能源电力

收稿日期: 2016-09-02; 录用日期: 2016-12-09.

[†]通信作者. E-mail: wwang@ncepu.edu.cn; Tel.: +86 10-61772965.

本文责任编辑: 周彤.

国家重点基础研究发展计划(“973”计划)(2012CB215203)资助.

Supported by National Key Basic Research Program of China(“973” Program) (2012CB215203).

在电力系统中将逐步由辅助能源(2015年, 装机占比11.3%, 发电量占比4%)发展为补充能源(2020年, 装机占比15%, 发电量占比9%), 并最终过渡为替代能源(2050年, 装机占比40%)和主导能源(未来, 装机占比60%)。随着新能源电力所占比重的逐渐增加, 其随机波动性对系统的影响将发生质变, 电力系统需要在随机波动的负荷需求与随机波动的电源之间实现能量的供需平衡, 这样将使电力系统的结构形态、运行控制方式以及规划建设与管理发生根本性变革, 形成新一代电力系统, 即新能源电力系统^[1]。在新能源电力系统中, 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, 在深入认知新能源电力系统特性的基础上, 创新控制与优化理论方法将是解决新能源电力规模化消纳难题的必由之路。

2 新能源电力系统控制与优化 (Control and optimization of alternate electrical power system with renewable energy sources)

新能源电力系统作为典型的复杂大系统, 实现其控制与优化需遵循分解与协调的原则, 既要考虑系统的整体协调与全局优化, 也要考虑各局部子系统的自治与优化。在新能源电力系统中, 电源侧与负荷侧的双随机特性、源-源及荷-荷之间的互补性、控制单元的复杂性与多样性等等因素都使得系统的整体性增强、控制难度加大。研究局部系统控制以及全局协同优化控制理论方法, 是发展新能源电力系统的基础性科学问题。基于多年来的研究与积累, 笔者将着重从电网友好型发电控制、基于多源互补的火力发电弹性控制、适应高比例新能源电力消纳的电网调度控制、需求侧资源特性与主动适应控制、基于分布式能源的微电网控制5个方面阐述新能源电力系统局部与全局控制中的关键科学问题。

2.1 电网友好型发电控制 (Grid-friendly generation control)

新能源发电的随机波动性是导致其规模化并网困难的主要原因, 实现电源侧的电网友好型发电控制, 尤其是实现新能源发电的电网友好型控制^[2], 可以有效降低其规模化并网对电力系统运行的影响, 促进规模化新能源电力的消纳。

相较于传统能源形式, 风能、太阳能等新能源型式作为一次能源不可控, 基于气象信息、历史数据及先验知识等进行超前分析与预测, 是提升其发电功率输出可控性的有效手段。因此, 新能源发电功率预测已成为缓解电网调峰压力、降低系统备用容量、提高电网对新能源发电的接纳能力的有效手段之一。功率预测^[3]按时间尺度可以分为分钟级、小时级和日级预测, 其中, 分钟级功率预测能够为单元机组的优化控制提供前馈输入信号, 小时级功率预测可用于电网的运行

调度控制与管理, 日前预测主要服务于制定电网日前调度。目前, 分钟级和小时级的功率预测精度可以达到90%及以上^[4-5], 日级预测的精度稍逊一些。为进一步提升新能源发电功率预测精度, 可综合考虑不同区域新能源资源特性的差异, 结合数值天气预报等高科技气象数据, 围绕预测机制进行技术与方法的创新。

对单元机组来说, 电网友好型发电控制与设计制造水平、控制策略等因素密切相关。以风电机组为例, 风电制造厂商及研究学者围绕气动系统的风能捕获控制、高自由度控制、传动系统的高效传递控制以及发电机的大范围变速控制等方面开展了大量研究, 基于上述研究设计的具有局部变桨等能力的智能叶片^[6], 可以从源头上实现风能捕获的有效控制, 提高功率输出的电网友好性。相对于设计制造水平, 单元机组的控制策略相对灵活、方法也较多^[7-9], 但更精细、更有效的优化控制方法亟待发展。

而对于新能源场站, 功率输出的可控性要好于单台机组, 一方面, 场站的输出功率波动性减弱; 另一方面, 更多的发电单元会提供更多的资源调配选择。考虑到新能源发电单元维数的爆炸性增长, 如何实现场站内可调度资源的优化配置与分配, 是新能源场站控制的重要内容^[10-11]。目前, 分级、分簇控制等策略^[12]已在新能源场站输出功率控制上发挥了重要作用, 未来的发展必将向着更精、更细、更优等方向发展。同时, 新能源场站的多能互补控制也已成为重要发展方向, 例如通过风电、光伏发电及储能之间的互补来平抑新能源电力的随机波动性。因此, 通过新能源场站的集中控制及分散优化协调控制, 是实现其电网友好型发电的基础与关键。

此外, 规模化新能源电力并网还会增加电力系统发生故障的风险, 因此, 电网友好型新能源发电控制还应该包含其在运行状态下的故障穿越能力和灾害条件下的处置能力。例如, 具有低电压穿越能力的风电机组可以确保电力系统在电压波动时不解列、避免连锁故障, 从而有效提高风电场运行的安全性和经济性^[13]。高电压穿越控制、频率穿越控制以及灾害处置等安全能力也同样重要, 它们都是电网友好型新能源发电技术的重要内涵。

2.2 基于多源互补的火力发电弹性控制 (Flexible control on coal-fired units based on multiple energy sources compensation)

多能源互补是利用水电、火电等传统发电型式输出功率可调可控的特性, 平抑风电、太阳能发电等新能源电力输出功率的随机波动性, 进而形成稳定可调可控的发电功率输出, 为实现电力系统中电能的实时供需平衡提供条件。但我国匮乏水电、燃气/燃油发电以及储能等灵活性电源, 调峰调频能力较差的燃煤火

电机组占据主导地位. 因此, 提升燃煤火电机组的弹性控制能力是我国实现多能源互补、提升电力系统消纳新能源电力的有效手段与必由之路.

火力发电的弹性控制包含3方面内容: 深度调峰控制、快速爬坡控制以及循环启停控制, 其中关键的控制技术如图1所示.

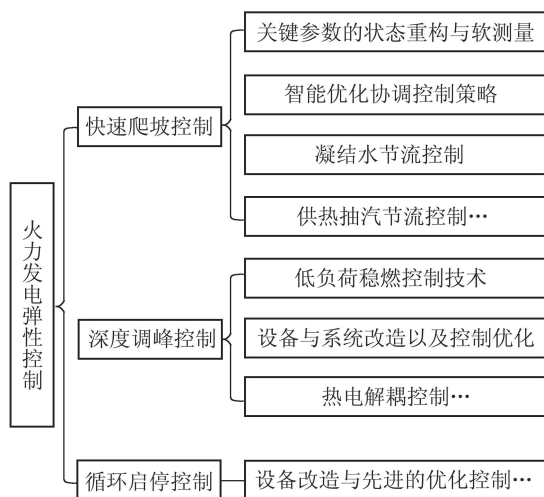


图 1 火力发电弹性控制包含的主要控制技术

Fig. 1 Main control techniques of coal-fired power units' flexible control

火电机组的深度调峰能力不足是导致我国弃风弃光现象严重的首要原因. 我国纯凝式火电机组的调峰区间一般为额定负荷的50%~100%, 热电联产机组在冬季供暖期机组的最小出力甚至只能达到额定负荷的60%~70%^[14], 这与德国、丹麦等国家的火电调峰能力相去甚远. 为提升火电机组的深度调峰能力, 在锅炉侧, 可以采用等离子点火、投油稳燃、投燃气稳燃、富氧燃烧等措施降低机组的最小稳燃负荷; 在此基础上, 通过优化锅炉侧的燃烧控制, 可以进一步拓展机组的低负荷运行区间; 在汽机侧、发电侧及其他设备系统, 通过设备改造与优化控制也是改善机组深度调峰能力的基本途径. 对于热电联产机组, 热电解耦控制可大大改善机组的调峰能力, 国外一般采用储热罐、电锅炉等蓄热装置实现热电解耦, 再根据负荷需求进行自适应调节^[15-17]. 需要指出的是, 低负荷运行一方面会使电厂损失上网电量, 另一方面也会使机组效率会大大下降, 据统计: 300 MW亚临界机组半负荷运行时的供电煤耗比额定负荷时增加约40 g/kWh, 而对于1000 MW超超临界机组, 这一数值约为20 g/kWh^[18]. 这些因素都会导致发电侧参与深度调峰的积极性下降, 因此, 对火电机组辅以调峰补偿及合理的市场机制是改善火电机组深度调峰能力的必要保障.

火电机组的快速爬坡能力有限也是诱发我国规模化新能源电力并网困难的重要因素. 由于现有预测技

术无法精确预测新能源发电出力, 电力系统调度一般通过增加额外的旋转备用来应对风光等波动性电源的随机性, 当系统中火电机组没有足够的爬坡能力提供额外的备用容量时, 将会导致联络线交换功率超过允许的偏差, 进而引发弃风弃光^[19]. 目前, 我国火电机组的爬坡速率一般为额定负荷的1%~1.5%/min^[20], 仅为德国等发达国家的1/3~1/2. 我国复杂的煤质煤种以及相对保守的运行控制方式都在一定程度上限制了火电机组速率的提高. 因此, 在实现煤质等关键参数的精准状态重构与软测量基础上, 发展智能优化协调控制方法, 是提高协调控制系统控制品质的基本手段. 为有效克服锅炉侧的大延迟大惯性, 进一步改善火电机组的快速变负荷能力^[21-22], 需要深度挖掘并合理机组蓄热. 例如, 凝结水节流控制可以在不明显影响机组效率和设备热应力的前提下, 快速改变机组负荷^[23]; 文献[24]建立了凝结水节流对机组输出功率的动态模型, 文献[25]设计的基于凝结水节流控制的新型变负荷控制策略较传统的协调控制策略, 将调节时间缩短了20 s, 同时大大减小了稳态误差; 文献[26-27]的现场试验结果表明, 凝结水节流可使机组的变负荷速率提升12 MW/min及以上, 能力甚至超过传统的协调控制策略. 供热抽汽节流控制^[28-29]、冷却工质节流控制^[30]也是现实可行的蓄热深度利用方法, 目前已受到工程技术人员与广大学者的广泛关注.

为最大程度地提高电力系统接纳新能源电力的能力, 实现火电机组的循环启停也已成为火电机组的重要发展方向. 传统意义上, 火电机组的启停控制周期长、安全性与经济性也大大降低, 但目前, 美国某电厂通过设备改造与先进的操作优化运行控制, 实现机组每天4次启停^[31]. 未来, 随着循环启停技术的不断革新, 火电机组将会为新能源电力的规模化消纳甚至全额消纳提供有力支撑.

2.3 适应高比例新能源电力消纳的电网调度控制(Grid dispatch control based on renewable energy's integration)

传统的电网调度控制^[32]以经济性最优为基本目标, 进入新能源电力系统时期, 调度目标需从传统的经济调度向绿色调度转变, 在保障电力可靠供应的前提下, 优先调度可再生发电资源, 并最大限度地减少能源、资源消耗和污染物排放. 因此, 新能源电力系统的电网调度控制将成为一个优先绿色调度目标、同时兼顾生产成本目标和污染物排放目标的多目标优化问题.

一方面, 发电成本是火电厂最重要的经济指标, 也是传统电力调度的核心优化目标, 在绿色调度中仍然需要考虑. 最小化火电机组发电成本的目标一般可表示为

$$\min F_1 = \min \sum_{i=1}^N a_i P_i^2 + b_i P_i + c_i, \quad (1)$$

式中 P_i 为第 i 台发电机组的有功功率, N 为发电机组的总数目, a_i , b_i 和 c_i 为发电机组的燃料耗能系数。

另一方面, 绿色调度中需要考虑最小化污染物排放, 包括 CO_2 , SO_2 , NO_x 等。由于 CO_2 在污染物中占比高达80%左右, 一般用火电厂的 CO_2 排放近似其污染排放量, 即

$$\min F_2 = \min \sum_{i=1}^N \alpha_i P_i^2 + \beta_i P_i + \gamma_i, \quad (2)$$

其中 α_i , β_i 和 γ_i 为第 i 台机组的 CO_2 排放系数。

综合上述1和2, 可以得到绿色调度的多目标优化数学模型。但实际上一般不存在同时使两个目标均达到最优的解, 通常是求取综合考虑两个目标的折中解, 求解方法有模糊优化、帕累托优化等^[33-34]。

在调度结构层面, 新能源电力系统调度要从传统的大电网集中式调度向分散协调、区域自治的调度方式转变。究其原因在于新能源电力能量密度低、分布范围广、发电单元数目巨大在很大程度上提高了调度的复杂性。因此, 通过基于多能源互补的虚拟发电厂调度控制, 实现区域发电的连续稳定与可调可控备受关注。虚拟发电厂^[35-36]是一组包括传统发电机组、风电及太阳能发电等新能源机组以及电力储能装置等对象的聚合体。这些对象不直接受电网运行调度中心的控制, 而是听命于虚拟发电厂控制中心, 通过该中心以一个整体的形式参与到电网的运行调度控制, 提高电力系统运行的安全性与可靠性。

此外, 在调度模型与方法层面, 要从传统的确定性模型与算法向适应高比例新能源接入的随机模型与算法转变。按照对新能源随机性的处理思路, 常见的调度建模方法主要分为模糊建模^[37-38]、机会约束规划建模^[39-40]、场景法建模^[41-42]等, 常用的调度求解方法包括数学规划^[43-45]和智能优化^[46-48]等等。

2.4 需求侧资源特性与主动适应控制(Demand sources characteristics and active adaptive control)

传统电力系统的发电侧相对可控、需求侧具有随机波动性, 电力系统调度一般遵循“用户至上”的原则, 安排相对可控的发电侧适应随机波动的负荷需求^[49]。随着电网峰谷差的增大以及新能源电力的规模化并网, 单纯依靠电源侧满足电能的实时供需平衡变得愈发困难。因此, 具有双随机波动特性的新能源电力系统已迫切要求负荷侧资源通过合理配置与主动适应控制, 减小电网峰谷差、缓解电源侧调峰调频的压力、提升电力系统运行的稳定性。实际上, 电力系统中存在着大量能与电网友好合作的可调整负荷(例如空调、暖气等)与可平移负荷(洗衣机、消毒柜等)^[50],

这些资源目前还没有得到充分利用。据统计: 美国典型峰荷日的峰荷时刻, 居民用电功率占到峰荷的30%, 其中2/3, 即20%属于可与电网友好合作的负荷, 其值甚至超过了电网中的旋转备用容量占比(13%); 而在我国, 居民用电功率占比约为15%~20%, 其中约有一半是可平移负荷。在充分认知该类资源特性的基础上, 引导用户通过负荷平移实现削峰填谷以及供需两侧的协调优化^[51], 是新能源电力系统时期负荷侧面临的新形式与新挑战^[52]。

在特性认知方面, 可根据需求侧综合资源^[53]在电网中的响应特点对其进行分类, 进而研究各类需求侧综合资源的响应机理, 构建相应的物理响应模型和激励成本模型^[54]; 分析需求侧综合资源对电网运行的影响, 定性研究各类需求侧综合资源的调控特性, 建立数学测算模型, 定量研究以荷代源的替代效益; 进一步构建适应不同响应特性的多种需求侧综合资源的优化组合激励机制, 实现不同响应速率、不同延迟特性、不同转移特性、不同价格弹性的多形态需求侧综合资源的互补协同; 并提出计及多形态需求侧综合资源的灵活调整机制与分散执行策略, 为促进可再生能源大规模并网消纳以及新能源电力系统的安全稳定运行提供坚强支撑^[55]。

针对大规模可再生能源发电并网后系统内调控资源不足的问题, 可构建兼容可再生能源发电的电力系统短期运行调度模型^[56]; 考虑短期内各类需求侧综合资源的可调度特性及响应特性, 在各类电价政策影响下, 以需求侧资源的价格弹性、需求弹性等指标为基准, 构建源-网-荷-储协调的多级电网双侧互动优化模型, 实现传统能源发电与可再生能源发电、电网与各类发电资源、需求侧资源与电网、发电资源之间的同步协调。

在上述基础上, 可进一步分析需求侧资源参与电网主动控制对于促进新能源并网消纳、降低系统备用容量、提高系统运行稳定性等方面的能力空间, 并总结影响需求侧综合资源应用效益的关键因素, 为推广需求侧资源的主动适应控制提供支撑。

2.5 基于分布式能源的微电网控制(Micro-grid control based on distributed energy)

微电网^[57]作为一项环保、灵活、高效的分布式发电管理形式, 是一种融合多种分布式发电为本地负荷供电的配电网, 它将电源、负荷、储能装置等结合成一个单一可控的单元, 是大力发展可再生能源, 提高供电电源可靠性, 扩大供电系统容量的重要途径。在微电网中, 由于存在大量的分布式电源, 每种分布式电源都各不相同, 其电压等级区分也并不明显, 因此控制起来并不容易。微电网整体控制策略是以各种分布式电源、储能装置和负荷的控制方法为基础, 形成的

各发电设备之间的协调组织和自动运行策略. 并网和孤岛双模式运行是微电网的重要特征, 实现在两种模式之间平滑切换是微电网双模式运行的关键. 文献[58]设计了分布式电源网侧变换器预同步控制单元, 提出了微电网运行模式平滑切换的控制流程, 实现了微电网两种运行模式之间的平滑转换. 文献[59]针对多逆变器型微电网系统的特点, 提出了统一控制器的设计方法, 该控制器由内部电压电流环和外部基于下垂特性的功率环组成, 并在外部功率控制环中加入了同步并网控制环节, 有效降低了微电网并网对电网的冲击, 提高了系统的稳定性和可靠性.

实际上, 目前流行的电动汽车^[60]和屋顶光伏^[61]均可归类于基于分布式能源的微电网控制, 以电动汽车为例, 在新能源发电高峰时, 可发挥其储能的作用储存电能, 一方面用于转换为机械能发挥其汽车的属性, 另一方面也可在用电高峰时, 将储存的电能释放到电网, 满足电力系统负荷需求. 随着我国电动汽车规模的大幅增长, 深入研究最大化其削峰填谷能力的控制策略, 将是未来新能源电力系统安全稳定运行的重要支撑.

3 结论(Conclusions)

规模化新能源电力的消纳难题已成为制约我国能源结构转型的重要瓶颈, 本文从我国的具体国情出发, 着力阐述了我国能源转型与新能源电力系统的现状, 分析了弃风弃光现象严重的原因, 并围绕“电源响应、电网响应、负荷响应”, 提出了解决规模化新能源电力消纳难题的5个关键问题: 电网友好型发电控制、基于多源互补的火力发电弹性控制、适应高比例新能源电力消纳的电网调度控制、需求侧资源特性与主动适应控制以及基于分布式能源的微电网控制, 并对其中存在的关键控制问题进行了深入讨论.

参考文献(References):

- [1] LIU Jizhen. Basic issues of the utilization of large-scale renewable power with high security and efficiency [J]. *Proceedings of the CSEE*, 2013, 33(16): 1 – 8.
(刘吉臻. 大规模新能源电力安全高效利用基础问题 [J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(16): 1 – 8.)
- [2] THIRINGER T. Grid-friendly connecting of constant-speed wind turbines using external resistors [J]. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 2002, 17(4): 537 – 542.
- [3] FENG Shuanglei, WANG Weisheng, LIU Chun, et al. Study on the physical approach to wind power prediction [J]. *Proceedings of the CSEE*, 2010, 30(2): 1 – 6.
(冯双磊, 王伟胜, 刘纯, 等. 风电场功率预测物理方法研究 [J]. 中国电机工程学报, 2010, 30(2): 1 – 6.)
- [4] OKUMUS I, DINLER A. Current status of wind energy forecasting and a hybrid method for hourly predictions [J]. *Energy Conversion and Management*, 2016, 123: 362 – 371.
- [5] FOLEY A M, LEAHY P G, MARVUGLIA A, et al. Current methods and advances in forecasting of wind power generation [J]. *Renewable Energy*, 2012, 37(1): 1 – 8.
- [6] YU Wei, ZHANG Mingming, XU Jianzhong. Effect of smart rotor control using deformable trailing edge flap on aerodynamic load reduction [J]. *Journal of Engineering Thermophysics*, 2013, 34(6): 1055 – 1060.
(余畏, 张明明, 徐建中. 基于柔性尾缘襟翼的风电叶片气动载荷智能控制 [J]. 工程热物理学报, 2013, 34(6): 1055 – 1060.)
- [7] LIU J, MENG H, HU Y, et al. A novel MPPT method for enhancing energy conversion efficiency taking power smoothing into account [J]. *Energy Conversion and Management*, 2015, 101: 738 – 748.
- [8] MENG Yongqing, WANG Jian, LI Lei, et al. New low voltage ride-through coordinated control schemes of permanent magnet synchronous generator considering rotor speed limit and DC discharging circuit optimization [J]. *Proceedings of the CSEE*, 2015, 35(24): 6283 – 6292.
(孟永庆, 王健, 李磊, 等. 考虑风机转速限制及卸荷电路优化的永磁同步电机新型低电压穿越协调控制策略 [J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(24): 6283 – 6292.)
- [9] XIA Xue, QI Yongzhi, LIU Yutian. Finite control strategy for wind turbine ramping power [J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2014, 38(20): 26 – 31.
(夏雪, 戚永志, 刘玉田. 风机爬坡功率的有限度控制策略 [J]. 电力系统自动化, 2014, 38(20): 26 – 31.)
- [10] ZHANG Ying, SHI Zhenyu. Voltage and reactive power coordinated control strategy of wind farm cluster [J]. *Electronic Technology and Software Engineering*, 2015, 18: 235.
(张颖, 史振宇. 风电场群的无功电压协调控制策略探讨 [J]. 电子技术与软件工程, 2015, 18: 235.)
- [11] CUI Yang, PENG Long, ZHONG Wuzhi, et al. Coordination strategy of reactive power control on wind farms based doubly fed induction generator [J]. *Proceedings of the CSEE*, 2015, 35(17): 4300 – 4307.
(崔杨, 彭龙, 仲悟之, 等. 双馈型风电场群无功分层协调控制策略 [J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(17): 4300 – 4307.)
- [12] LIU Jizhen, LIU Yu, ZENG Deliang, et al. Optimal short-term load dispatch strategy in wind farm [J]. *Science China Technological Sciences*, 2012, 4(42): 437 – 442.
(刘吉臻, 柳玉, 曾德良, 等. 单一风电场的短期负荷调度优化策略 [J]. 中国科学, 2012, 4(42): 437 – 442.)
- [13] XU Hailiang, ZHANG Wei, HE Yikang, et al. A review on low voltage ride-through technologies and prospect for dfig wind turbines [J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2013, 37(20): 8 – 15.
(徐海亮, 章玮, 贺益康, 等. 双馈型风电机组低电压穿越技术要点及展望 [J]. 电力系统自动化, 2013, 37(20): 8 – 15.)
- [14] DENG Tuoyu, TIAN Liang, LIU Jizhen. A control method of heat supply units for improving frequency control and peak load regulation ability with thermal storage in heat supply net [J]. *Proceedings of the CSEE*, 2015, 35(14): 3626 – 3633.
(邓拓宇, 田亮, 刘吉臻. 利用热网储能提高供热机组调频调峰能力的控制方法 [J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(14): 3626 – 3633.)
- [15] HAESLONCKX D, PEETERS L, HELSEN L, et al. The impact of thermal storage on the operational behaviour of residential CHP facilities and the overall CO₂ emissions [J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2007, 11(6): 1227 – 1243.
- [16] KHAN K H, RASUL M G, KHAN M M K. Energy conservation in buildings: cogeneration and cogeneration coupled with thermal energy storage [J]. *Applied Energy*, 2004, 77(1): 15 – 34.
- [17] CELADOR A C, ODRIOZOLA M, SALA J M. Implications of the modelling of stratified hot water storage tanks in the simulation of CHP plants [J]. *Energy Conversion and Management*, 2011, 52(8): 3018 – 3026.
- [18] LIU Fuguo, JIANG Xuexia, LI Zhi. Investigation on affects of generator load on coal consumption rate in fossil power plant [J]. *Power System Engineering*, 2008, 24(4): 47 – 49.
(刘福国, 蒋学霞, 李志. 燃煤发电机组负荷率影响供电煤耗的研究 [J]. 电站系统工程, 2008, 24(4): 47 – 49.)

- [19] WANG Ying, ZHANG Kaifeng, FU Jiayu, et al. Optimization control method of wind/storage system for suppressing wind power ramp rate [J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2013, 37(13): 17 – 23. (王颖, 张凯峰, 付嘉渝, 等. 抑制风电爬坡率的风储联合优化控制方法 [J]. 电力系统自动化, 2013, 37(13): 17 – 23.)
- [20] LIU Xinping, TIAN Liang, ZENG Deliang, et al. Modeling and analysis for the units load regulation by condensate throttling [J]. *Journal of North China Electric Power University*, 2009, 36(2): 80 – 84. (刘鑫屏, 田亮, 曾德良, 等. 凝结水节流参与机组负荷调节过程建模与分析 [J]. 华北电力大学学报, 2009, 36(2): 80 – 84.)
- [21] WU X, SHEN J, LI Y, et al. Stable model predictive tracking control for boiler-turbine coordinated control system [J]. *IFAC Proceedings Volumes*, 2012, 45(21): 201 – 206.
- [22] WU X, SHEN J, LI Y, et al. Data-driven modeling and predictive control for boiler-turbine unit using fuzzy clustering and subspace methods [J]. *ISA Transactions*, 2014, 53(3): 699 – 708.
- [23] LAUSTERER G K. Improved maneuverability of power plants for better grid stability [J]. *Control Engineering Practice*, 1998, 6(12): 1549 – 1557.
- [24] HU Y, ZENG D L, LIU J Z, et al. Dynamic model for controller design of condensate throttling systems [J]. *ISA Transactions*, 2015, 58: 622 – 628.
- [25] WANG W, LIU J, ZENG D, et al. Modeling for condensate throttling and its application on the flexible load control of power plants [J]. *Applied Thermal Engineering*, 2016, 95: 303 – 310.
- [26] LI Xijun, ZHAO Shuang, ZHOU Hongren, et al. Experiment of condensate throttling response to the load of daihai power plant Unit 1 [J]. *Power System Engineering*, 2010, 4: 39 – 41. (李西军, 赵爽, 周虹任, 等. 岱海电厂#1机组凝结水节流响应负荷变化试验分析 [J]. 电站系统工程, 2010, 4: 39 – 41.)
- [27] YAO Jun, CHEN Weihe. Experimental study of primary frequency regulation for 900 MW supercritical Units [J]. *East China Electric Power*, 2006, 34(8): 84 – 87. (姚峻, 陈维和. 900 MW超临界机组一次调频试验研究 [J]. 华东电力, 2006, 34(8): 84 – 87.)
- [28] DENG Tuoyu, TIAN Liang, LIU Jizhen. Multi-scale feedforward coordinated control scheme for load command of heat supply Units [J]. *Thermal Power Generation*, 2016, 3: 48 – 53. (邓拓宇, 田亮, 刘吉臻. 供热机组负荷指令多尺度前馈协调控制方案 [J]. 热力发电, 2016, 3: 48 – 53.)
- [29] WANG Qi. *Research on optimization control for heating units under the condition of large-scale integration of wind power* [D]. Beijing: North China Electric Power University, 2013. (王琪. 风电规模化并网条件下供热机组优化控制研究 [D]. 北京: 华北电力大学, 2013.)
- [30] WANG W, LIU J, ZENG D, et al. An improved coordinated control strategy for boiler-turbine units supplemented by cold source flow adjustment [J]. *Energy*, 2015, 88: 927 – 934.
- [31] COCHRAN Jacqueline, LU Debra, KUMAR Nichil. Improved flexibility of coal-fired power plant: from baseload power to peak power [J]. *Cornerstone*, 2014, 4: 49 – 53. (杰奎琳·科克兰, 黛布拉·卢, 尼基尔·库马尔. 提高燃煤电厂弹性: 从基荷电力到调峰电力 [J]. 基石, 2014, 4: 49 – 53.)
- [32] XIN Yaozhong, SHI Junjie, ZHOU Jingyang, et al. Technology development trends of smart grid dispatching and control systems [J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2015, 39(1): 2 – 8. (辛耀中, 石俊杰, 周京阳, 等. 智能电网调度控制系统现状与技术展望 [J]. 电力系统自动化, 2015, 39(1): 2 – 8.)
- [33] ZHANG Wen. *Studies on power system reactive power optimization based on particle swarm algorithm* [D]. Jinan: Shandong University, 2006. (张文. 基于粒子群体优化算法的电力系统无功优化研究 [D]. 济南: 山东大学, 2006.)
- [34] ZHANG Xiaohui, DONG Xinghua. Research on multi-objective scheduling for low-carbon power system with wind farms [J]. *Power System Technology*, 2013, 37(1): 24 – 31. (张晓辉, 董兴华. 含风电场多目标低碳电力系统动态经济调度研究 [J]. 电网技术, 2013, 37(1): 24 – 31.)
- [35] LIU Jizhen, LI Mingyang, FANG Fang, et al. Review on virtual power plants [J]. *Proceedings of the CSEE*, 2014, 34(29): 5103 – 5111. (刘吉臻, 李明扬, 房方, 等. 虚拟发电厂研究综述 [J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(29): 5103 – 5111.)
- [36] PUDJANTO D, RAMSAY C, STRBAC G. Virtual power plant and system integration of distributed energy resources [J]. *IET Renewable Power Generation*, 2007, 1(1): 10 – 16.
- [37] CHEN Haiyan, CHEN Jinfu, DUAN Xianzhong. Fuzzy modeling and optimization algorithm on dynamic economic dispatch in wind power integrated system [J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2006, 30(2): 22 – 26. (陈海焱, 陈金富, 段献忠. 含风电场电力系统经济调度的模糊建模及优化算法 [J]. 电力系统自动化, 2006, 30(2): 22 – 26.)
- [38] ZHANG Xiaohua, ZHAO Jinquan, CHEN Xingying. Fuzzy modeling and optimization based on unit commitment of a power system integrated with wind power [J]. *Science and Technology Review*, 2009, 27(20): 102 – 105. (张晓花, 赵晋泉, 陈星莺. 含风电场机组组合的模糊建模和优化 [J]. 科技导报, 2009, 27(20): 102 – 105.)
- [39] ZHANG Ningyu, GAO Shan, ZHAO Xin. An unit commitment model and algorithm with randomness of wind power [J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2013, 28(5): 22 – 29. (张宁宇, 高山, 赵欣. 一种考虑风电随机性的机组组合模型及其算法 [J]. 电工技术学报, 2013, 28(5): 22 – 29.)
- [40] DING X, LEE W J, WANG J X, et al. Studies on stochastic unit commitment formulation with flexible generating units [J]. *Electric Power Systems Research*, 2010, 80(1): 130 – 141.
- [41] WANG J, BOTTERUD A, BESSA R, et al. Wind power forecasting uncertainty and unit commitment [J]. *Applied Energy*, 2011, 88(11): 4014 – 4023.
- [42] HOYLAND K, WALLACE S W. Generating scenario trees for multistage decision problems [J]. *Management Science*, 2001, 47(2): 295 – 307.
- [43] YE Rong, CHEN Haoyong, WANG Gang, et al. A mixed integer programming method for security-constrained unit commitment with multiple wind farms [J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2010, 34(5): 29 – 33. (叶荣, 陈皓勇, 王钢, 等. 多风电场并网时安全约束机组组合的混合整数规划解法 [J]. 电力系统自动化, 2010, 34(5): 29 – 33.)
- [44] XIE Yuguang, JIANG Xiaodong. Impact of energy storage system on the unit commitment problem with volatile wind power [J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2011, 35(5): 19 – 24. (谢毓广, 江晓东. 储能系统对含风电的机组组合问题影响分析 [J]. 电力系统自动化, 2011, 35(5): 19 – 24.)
- [45] AI Xin, LIU Xiao, SUN Cuiying. A fuzzy chance constrained decision model for unit commitment of power grid containing large-scale wind farm [J]. *Power System Technology*, 2011, 35(12): 202 – 207. (艾欣, 刘晓, 孙翠英. 含风电场电力系统机组组合的模糊机会约束决策模型 [J]. 电网技术, 2011, 35(12): 202 – 207.)
- [46] WANG Yantao, WANG Daliang. Determination of spinning reserve of power grid containing wind [J]. *Electrical Measurement and Instrumentation*, 2012, 49(12): 22 – 27. (王燕涛, 王大亮. 计及风电的系统旋转备用容量的确定 [J]. 电测与仪表, 2012, 49(12): 22 – 27.)
- [47] XIONG Hu, XIANG Tiejuan, CHEN Hongkun, et al. Research of fuzzy chance constrained unit commitment containing large-scale intermittent power [J]. *Proceedings of the CSEE*, 2013, 33(13): 36 – 44.

- (熊虎, 向铁元, 陈红坤, 等. 含大规模间歇式电源的模糊机会约束机组组合研究 [J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(13): 36 – 44.)
- [48] DANG C, LI M. A floating point genetic algorithm for solving the unit commitment problem [J]. *European Journal of Operational Research*, 2007, 181(3): 1370 – 1395.
- [49] THAKUR J, CHAKRABORTY B. Demand side management in developing nations: a mitigating tool for energy imbalance and peak load management [J]. *Energy*, 2016, 114: 895 – 912.
- [50] FU Yang, JIANG Yiliu, LI Zhenkun, et al. Optimal economic dispatch for microgrid considering shiftable loads [J]. *Proceedings of the CSEE*, 2014, 34(16): 2612 – 2620.
(符杨, 蒋一鏊, 李振坤, 等. 计及可平移负荷的微网经济优化调度 [J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(16): 2612 – 2620.)
- [51] STLUKA P, GODBOLE D, SAMAD T. Energy management for buildings and microgrids [C] // *The 50th IEEE Conference on Decision and Control and European Control Conference*. IEEE, 2011: 5150 – 5157.
- [52] TANG Qingfeng, LIU Nian, ZHANG Jianhua. Theory and key problems for automated demand response of user side considering generalized demand side resources [J]. *Power System Protection and Control*, 2014, 42(24): 138 – 147.
(汤庆峰, 刘念, 张建华. 计及广义需求侧资源的用户侧自动响应机理与关键问题 [J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(24): 138 – 147.)
- [53] ZENG Ming, YANG Yongqi, XIANG Hongwei, et al. Optimal dispatch model based on coordination between “generation-grid-load-energy storage” and demand-side resource [J]. *Electric Power Automation Equipment*, 2016, 36(2): 102 – 111.
(曾鸣, 杨雍琦, 向红伟, 等. 兼容需求侧资源的“源-网-荷-储”协调优化调度模型 [J]. 电力自动化设备, 2016, 36(2): 102 – 111.)
- [54] YANG Xuying, ZHOU Ming, LI Gengyin. Survey on demand response mechanism and modeling in smart grid [J]. *Power System Technology*, 2016, 40(1): 220 – 226.
(杨旭英, 周明, 李庚银. 智能电网下需求响应机理分析与建模综述 [J]. 电网技术, 2016, 40(1): 220 – 226.)
- [55] ZENG M, LI S L, XUE S. A plan for optimizing technologies to support variable renewable generation in China [J]. *Power*, 2013, 157(12): 36 – 41.
- [56] ZHAO Bo, XUE Meidong, CHEN Rongzhu, et al. An economic dispatch model for microgrid with high renewable energy resource penetration considering forecast errors [J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2014, 38(7): 1 – 8.
(赵波, 薛美东, 陈荣柱, 等. 高可再生能源渗透率下考虑预测误差的微电网经济调度模型 [J]. 电力系统自动化, 2014, 38(7): 1 – 8.)
- [57] YANG Xinfu, SU Jian, LÜ Zhipeng, et al. Overview on micro-grid technology [J]. *Proceedings of the CSEE*, 2014, 34(1): 57 – 70.
(杨新法, 苏剑, 吕志鹏, 等. 微电网技术综述 [J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(1): 57 – 70.)
- [58] ZHANG Chun, CHEN Minyou, WANG Zhencun. Study on control scheme for smooth transition of micro-grid operation modes [J]. *Power System Protection and Control*, 2011, 39(20): 1 – 5.
(张纯, 陈民铀, 王振存. 微网运行模式平滑切换的控制策略研究 [J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(20): 1 – 5.)
- [59] LI Y W, VILATHGAMUWA D M, LOH P C. Design, analysis, and real-time testing of a controller for multibus microgrid system [J]. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2004, 19(5): 1195 – 1204.
- [60] LI Huiling, BAI Xiaomin, TAN Wen, et al. Coordination control for grid-connection of plug-in hybrid electric vehicles and distributed generation [J]. *Power System Technology*, 2013, 37(8): 2108 – 2115.
(李惠玲, 白晓民, 谭闻, 等. 电动汽车与分布式发电电网的协调控制研究 [J]. 电网技术, 2013, 37(8): 2108 – 2115.)
- [61] WANG Jianqiu. *Construction and power quality analysis of rooftop PV system* [D]. Kunming: Yunnan Normal University, 2014.
(王建秋. 屋顶光伏发电系统的构造与电能质量分析 [D]. 昆明: 云南师范大学, 2014.)

作者简介:

刘吉臻 (1951–), 男, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为复杂系统建模与控制、工业过程测控理论与技术, E-mail: ljz@ncepu.edu.cn;

王玮 (1986–), 男, 讲师, 研究方向为热力系统建模与控制、火电机组节能优化控制, E-mail: wwang@ncepu.edu.cn;

胡阳 (1986–), 男, 讲师, 主要研究方向为新能源发电过程建模与控制, E-mail: hooyoung@ncepu.edu.cn;

刘敦楠 (1979–), 男, 副教授, 主要研究方向为电力市场和电力系统经济运行, E-mail: liudunnan@163.com;

李明扬 (1983–), 男, 讲师, 主要研究方向为电力系统控制与优化调度, E-mail: limy@ncepu.edu.cn.