

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.230403

“规划-运行”融合框架下基于“源-荷”多时序联合场景的新型配电系统无功资源优化配置

朱丹丹¹, 周前¹, 贾勇勇¹, 刘方², 朱东方², 高国栋², 陆荣欣²

(1. 国网江苏省电力公司电力科学研究院, 江苏 南京 211100; 2. 上海电力大学电气工程学院, 上海 200090)

摘要: 新型配电系统(new distribution system, NDS)“源-荷”多时序不确定性、无功设备稳态/动态多样性, 决定了无功配置与运行调节需要联合优化。对此, 基于“规划-运行”融合框架开展 NDS“源-荷”多时序联合场景下的无功资源优化配置研究。首先, 基于 NDS 新形态发展趋势, 构建融合大数据分析、多时域运行模拟、综合效益评估的“规划-运行”联合优化框架。然后, 基于电容器稳态和 DSTATCOM 动态无功设备运行特性分析, 顺序优化选址定容。基于 K-means 聚类方法构建“源-荷”多尺度联合时序场景, 通过稳态/动态无功设备协调配合深层次挖掘多尺度调节资源, 实现 NDS 分级无功平衡下运行模拟分析。建立 NDS 无功“规划-运行”评价指标体系开展全环节综合效益评估。最后, 以 IEEE33 节点配网系统为例, 开展无功“规划-运行”联合优化仿真分析。结果表明, 所提模型具有自适应“源-荷”不确定性多时序联合场景的能力, 内嵌多时域运行模拟的规划方案更加全面和贴近实际。

关键词: 新型配电系统; 规划运行; 无功调节; 多时序场景; 分布式可再生能源

Optimal allocation of reactive power resources in a new distribution system based on the “source-load” multi-sequence scenario in a “planning-operation” fusion framework

ZHU Dandan¹, ZHOU Qian¹, JIA Yongyong¹, LIU Fang², ZHU Dongfang², GAO Guodong², LU Rongxin²

(1. State Grid Jiangsu Electric Power Company Electric Power Research Institute, Nanjing 211100, China;

2. School of Electrical Engineering, Shanghai Electric Power University, Shanghai 200090, China)

Abstract: “Source-load” multiple timing uncertainties and the steady-state/dynamic diversity of reactive power equipment in a new type of distribution system (NDS) determine the need for joint optimization of reactive power allocation and operational regulation. Therefore, based on the “planning-operation” fusion framework, research on optimal allocation of reactive power resources in the “source-load” multi timing joint scenario of NDS is carried out. First, based on the development trend of new forms of NDS, a “planning-operation” joint optimization framework integrating big data analysis, multi time domain operation simulation, and comprehensive benefit evaluation is constructed. Then, based on capacitor steady-state and DSTATCOM dynamic reactive power equipment operation characteristics analysis, sequential optimization of location and capacity is determined. A “source-load” multi-scale joint timing scenario is constructed based on the K-means clustering method, and simulation analysis of NDS operation is achieved in hierarchical reactive power balance through coordination of steady-state/dynamic reactive power devices and deep mining of multi-scale adjustment resources. An NDS reactive power “planning-operation” evaluation index system is established to conduct comprehensive benefit evaluation of the entire process. Finally, taking the IEEE33-bus distribution network system as an example, a reactive power “planning-operation” joint optimization simulation analysis is conducted. The results show that the proposed model has the ability to adapt to the “source-load” uncertainty and multiple timing joint scenarios, and the planning scheme with embedded multi time domain operation simulation is more comprehensive and practical.

This work is supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 52207121).

Key words: new distribution system; planned operation; reactive power regulation; multi-timing scenario; distributed renewable energy

基金项目: 国家自然科学基金项目资助(52207121); 国网江苏省电力有限公司科技项目资助“大规模分布式新能源计入电网侧无功配置及电压协调运行技术研究”(J2022052)

0 引言

新型配电系统(new distribution system, NDS)作为新型电力系统建设的重要组成部分^[1-2],以数字化为支撑,以满足新业态发展为目标,拓扑清晰、源荷耦合,具有透明化、互动化、灵活化等特征。新能源分布式应用是我国落实“双碳”目标的重要方式^[3-4],对此国家布局“扶贫光伏”、“整县光伏”目标,推动分布式发电广泛部署。未来,随着风电、光伏发电等分布式可再生能源(distributed renewable generation, DRG)大规模接入NDS,电压越限、电压波动等问题较为突出^[5],极端情况下制约DRG消纳,影响NDS安全运行,使得充分利用NDS内DRG逆变器、SVG、DSTATCOM、新型负荷等新型动态无功资源与传统无功资源配合,推动无功规划与电压调节技术升级势在必行^[6]。

针对高比例DRG接入NDS无功规划问题,国内外开展了广泛研究。文献[7]综合考虑相关技术标准以及调压方式、主变分接头、DRG和弱环结构对规划的影响,形成工程适用性较强的无功规划方案;文献[8]针对高渗透率风光不确定性,构造区域暂态电压安全裕度指标以及无功基准场景来指导规划,形成较为合理的布点方法;文献[9-10]深入分析光伏不同接入位置和容量对配电系统电压和网损的影响,构建无功电压分区方法,结合中枢节点能控可观性指标确定分区中枢母线,通过调节光伏输出功率,实现分区电压综合治理;文献[11]结合配网拓扑结构,通过“寻找-补偿-再寻找”循环计算获取补偿点,实现网损最大节点无功精准配置,若进一步考虑设备的接入容量、数量和经济性,研究将更具实用价值。

NDS无功规划和电压调节相互影响,为提升规划方案可行性需要结合运行模拟,规划作为运行的边界条件,运行结果反馈指导规划,需要“规划-运行”融合迭代以满足实际需求。文献[12]考量配电网“规划-运行”中电压质量、经济效益、自治能力等要素,采用双层机会约束规划构建有功/无功可控资源配置模型,实现时序运行与配置方案协同优化;文献[13]综合考虑配电网终端用户差异化可靠性需求,针对规划-运行两阶段不同特点建立可靠性等级划分和评估方法,对于指导规划-运行联合优化适用性较强;文献[14]建立“规划-运行”无功补偿协调配置双层模型,上层规划优化设备安装位置、类型和容量,下层运行综合考虑不同负荷场景,优化设备投切方案,通过分级无功平衡使方案满足不同场景下的补偿需求。

上述研究,在NDS无功规划与运行联合优化方面取得较为理想的效果,但多数针对于传统调压设备——有载调压变压器(on-line tap changer, OLTC)和并联电容器组(shunt capacity bank, SCB),其容量大、成本低,稳态支撑效果显著,但属于离散调节,难以响应快速无功补偿。随着DRG渗透率不断提升,其出力可预测时域小,波动带宽大,混叠多类型负荷功率波动,容易造成馈线电压动态波动和越限,形成NDS运行态势预测分析的挑战^[15]。目前,双馈感应风机(doubly-fed induction generator, DFIG)和光伏逆变器通过有功/无功解耦控制,可响应连续快速无功补偿,亦成为无功调控的有效手段^[16-17]。文献[15]深入研究风光预测误差对DRG无功调控能力的影响,并根据稳态/动态调控需求和设备配合方式,建立配电网多时间尺度动态无功优化模型,通过储备充足动态无功满足电压快速调节需求;文献[18]研究含高比例可再生能源配电网就地分散式电压管控方法,并通过风电、光伏参与无功电压调节,有效地抑制电压波动;文献[19]考虑DRG、OLTC、储能、负荷调整等主动管理手段,建立配电网规划-运行双层优化模型,规划层基于系统运行特性综合配置SCB,运行层计及“源网荷储”各环节时序特性,利用DRG和储能无功调节能力支撑系统经济安全运行,若进一步协调其他稳态和动态无功设备,研究方案将更加完善。此外,DSTATCOM作为电压质量控制的重要动态补偿装置,已初步应用于NDS关键区域,但由于成本较高,安装数量受限,未来随着DRG并网规模增加,可从提升DRG承载能力、经济效益等视角决策其容量选择和应用,成为新形势下无功规划的重要资源。文献[20]针对提升DRG渗透率加剧潮流不确定性、恶化电能质量问题,构建DSTATCOM配置与整定多目标协调优化模型,充分考虑其电压整定及运行效益,工程适用性较强,若进一步研究与其他稳态/动态调节方案配合,将更加符合新型配电系统发展方向。

NDS无功配置不仅要适应典型运行场景,更要满足长期发展需求^[5]。DRG广泛接入与用户深度耦合,“源-荷”界限逐渐模糊,须生成“源-荷”多尺度联合时序场景^[21],以支撑长期规划和短期运行模拟。现有基于抽样数据的典型场景已难以满足“源-荷”多元数据融合下多维度、时效性与准确性要求,海量运行数据也使经验选择方案难以应对新型“规划-运行”技术需求^[22]。为有效辨识NDS无功规划方案在运行层面的潜在问题,须运用大数据分析理论,通过深层剖析数据信息并还原运行过程,结合局部学习和模型融合获得技术指标,聚类形成

典型运行场景^[23], 成为新趋势。

基于上述研究基础和挑战, 本文基于“规划-运行”融合框架开展“源-荷”多时序联合场景下的 NDS 无功资源优化配置研究。首先, 基于 NDS 新形态发展趋势, 分析无功规划与运行模拟之间互为支撑、关联迭代关系, 构建融合大数据分析、多时域运行模拟、“规划-运行”综合评估的联合优化框架。其次, 分析并联电容器(shunt capacity, SC)稳态和 DSTATCOM 动态无功设备运行特性, 构建选址定容顺序优化模型, 并建立 NDS 多时间尺度电压调节运行模拟模型, 基于 K-means 聚类方法构建“源-荷”多尺度联合时序场景, 针对长周期运行模拟难以反应高比例 DRG 接入下真实电压调节需求的问题, 通过稳态/动态无功设备协调配合深层次挖掘多尺度调节资源, 支撑分级无功平衡。然后, 建立 NDS 无功“规划-运行”评价指标体系, 综合对比各类无功资源调节成本与特性, 结合运行调控策略, 满足“源-网-荷”协同发展下的全环节综合效益评估。最后, 以 IEEE33 节点配网系统为例, 开展无功“规划-运行”联合优化仿真分析, 验证模型在“源-荷”多时序不确定性场景下的适应能力。

1 NDS 无功“规划-运行”联合优化框架

1.1 总体框架构建

NDS 无功补偿应坚持^[7]: 全面规划、合理布局、分层分区、就地平衡原则; 总体平衡与局部平衡相结合, 以局部为主原则; 集中补偿与分散补偿相结合, 以分散补偿为主原则; 高压补偿与低压补偿相结合, 以低压补偿为主; 降损与调压相结合, 以降损为主原则。无功配置与电压调节作为 NDS 无功补偿两大核心问题, “源-网”多环节无功设备的技术经济特征, 也决定了需要: (1) 在不同时域内为系统提供灵活性无功支撑, 制定多类型设备协调配合的补偿配置和调节策略, 保障系统安全运行; (2) 最大限度地为系统创造收益缩短投资回收期、提高设备利用率; (3) 支撑快速无功补偿平抑电压波动, 且避免反复频繁控制操作等。

NDS 无功资源合理选址与定容为运行层面提供充裕容量空间; 为辨识规划方案在运行层面的潜在问题, 须建立符合 NDS 新形态的运行模拟方法, 评估规划方案在海量场景下的综合效益。因此, NDS 无功资源规划应融合大数据分析、多时间尺度运行模拟、“规划-运行”综合评估等关键技术。对此构建包含无功规划、运行模拟和效益评估的联合优化框架, 如图 1 所示。



图 1 NDS 无功“规划-运行”联合优化总体框架

Fig. 1 Overall framework of NDS reactive power "planning-operation" joint optimization

1) 无功资源规划层

NDS 无功规划侧重在既定网架基础上研究无功补偿方式、地点和容量。结合“源-荷”多尺度时序场景和设备技术经济特征, 生成协同规划方案。因此, 明确模型应用场景、约束和目标是开展规划的前提。

(1) 协同规划 SCB 稳态及 DSTATCOM 动态无功资源的选址定容, 提高规划方案在高比例 DRG 接入场景下的灵活性, 适应功率高频幅波动, 提升 NDS 对新能源的承载能力。

(2) 仅考虑单一环节的规划思路已无法适应“源-网-荷-储”一体化发展需求, 需要多环节协调, 充分利用设备调控特性上的差异性和互补性, 例如: 风光有功出力和无功裕度互补、动态/静态设备在补偿容量和调节速率的互补, 从而共同降低电压和潮流波动, 实现灵活性资源均衡协调。

2) 无功调节模拟层

NDS 运行环境多样、决策环境复杂等特点对无功灵活性提出了新要求, 使精细化运行模拟成为评估规划方案的必要手段。

运行模拟的基本任务是客观模拟多时间尺度下 NDS 电压调节的情况, 校验规划方案可行性。充分考虑“双碳”目标倒逼驱动, 建立从不同 DRG 渗透率、负荷密度等长期规划场景, 到短期典型/极端天气等多样化功率匹配场景, 形成基于“源-荷”多

时序联合场景的运行模拟,对规划方案全方位评估。

3) 综合效益评估层

NDS 无功规划需要精细化需求分析和效益评估,以平衡无功充裕性与投资经济性,实现合理配置。NDS 内新能源有功/无功耦合是重点考虑因素,特别是有功出力影响调压能力,需要均衡需求。综合对比各类资源的调节成本与特性,构建满足“源-网-荷-储”协同发展的规划方案全环节综合效益评估技术,并重点考虑极端天气场景下的调节需求,协同保障可靠性评估。

1.2 NDS “规划-运行”联合优化思路

NDS 无功设备选址、定容目标是提升系统电压稳定性、降低网损,而电压分析和网损计算需要 DRG 和各无功设备优化运行后得到,且运行时各设备最优出力决策又以规划位置和容量为前提,需要“规划-运行”联合迭代计算,与双层规划模型相匹配。为了在 NDS 无功配置中考虑运行策略的影响,实现长期规划与短期运行决策协调,本文采用双层规划模型对无功资源选址定容-运行模拟电压调节进行联合建模,如图 2 所示。

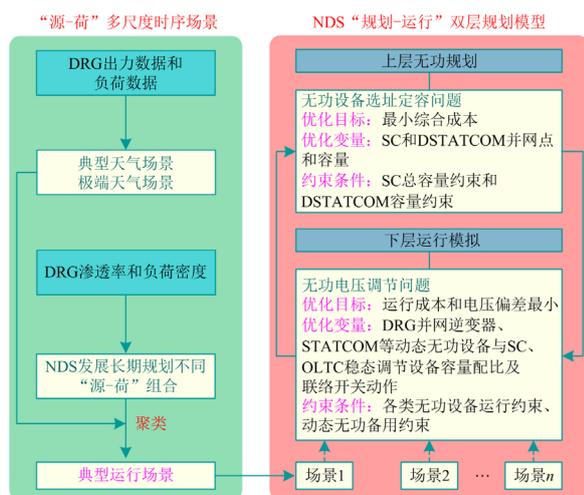


图 2 NDS “规划-运行”双层决策迭代计算流程

Fig. 2 NDS “planning-operation” two-level decision-making iterative calculation process

双层决策具有两层递阶结构,上层和下层均有各自优化目标和约束条件,上层优化目标和约束不仅与上层决策变量相关,还依赖于下层最优解,而下层最优解又受上层决策变量影响。双层规划模型是处理 NDS 无功“规划-运行”的有效方法,上层确定无功设备接入位置和容量,下层考虑 NDS 精细化电压调节。

1) 上层无功资源优化配置建模思路

上层规划问题用于确定 SC、DSTATCOM 等无

功资源的安装位置和容量,属于长期规划问题,需要综合考虑设备投资和运行成本。

本文以年费用(含下层运行费用)最小为目标函数,优化变量为 SC、DSTATCOM 安装位置与容量。为简化计算,SC、DSTATCOM 的容量可表征为装置数量,将连续容量变量转化为离散装置数量,使容量和布局统一为整数规划问题。

2) 下层电压调节运行模拟建模思路

下层电压调节运行模拟,根据上层规划结果和典型运行场景,以 NDS 网损和电压不平衡最小等为目标,决策变量为 SC 投切组数、OLTC 档位、联络线开关动作等离散变量,以及 DRG 逆变器和 DSTATCOM 动态调节资源的作用域。

在 NDS 电压调节运行模拟阶段,根据长期 DRG 渗透率、负荷密度预测以及短期负荷及风光资源特征数据,基于 K-means 聚类构建多时序典型场景以满足运行模拟需求。

鉴于 OLTC、SC 等设备通常位于台区或馈线首端,单次调节对网络潮流影响显著,且不宜频繁动作,适宜长周期全局运行模拟,初步优化全网潮流;DRG 逆变器及 DSTATCOM 适宜频繁调节且布局分散,可提供动态连续无功实现就地平衡,可支撑短周期局部调节。因此,无功电压调节运行模拟中,根据“源-荷”功率波动和电压调节需求,协调 DRG 逆变器、STATCOM 等动态无功设备与 SC、OLTC 稳态设备调节功率配比,结合联络开关网络重构,优化网络潮流。

大规模 DRG 和多元负荷功率波动较为频繁,特别是极端天气场景下,为反应真实调节需求,保障电压安全,通过总控制序列确定 DRG 逆变器和 DSTATCOM 调节资源的作用域,使预留动态调节空间满足日内电压波动平抑快速调节需求,通过迥异无功资源协调配合,实现分级无功平衡。优化周期为 24 h,时间粒度为 1 h,通过对多时序场景进行逐小时的全景运行模拟,实现对系统运行状态和时序耦合特性的精确描述。

3) 上下层之间交互传递关系

上层无功规划形成 SC、DSTATCOM 并网点和容量备选集,选取某一组合 $[S_{SC}, S_{DST}]$ ($S_{SC} \in [S_{SC,0}, S_{SC,0} + \Delta S_{SC}, \dots, S_{SC,max}]$ 、 $S_{DST} \in [S_{DST,0}, S_{DST,0} + \Delta S_{DST,0}, \dots, S_{DST,max}]$) 传递给下层运行模拟,并作为下层决策变量优化的初始条件和约束;下层在当前无功配置下,根据典型运行场景数据(特别是极端天气场景)优化电压平抑波动后的无功出力曲线,形成模拟运行结果反馈给上层。

上层规划模型据此计算当前容量配置组合下的最小综合成本，再选取下一个配置组合，重复上述过程。遍历备选集所有组合，投资回收期作为评价标准，即可获得最优无功配置组合与对应最优电压调节策略。通过内外层联合形成内嵌多时序模拟的“运行-规划”一体化优化模型。

2 NDS 无功资源选址定容优化建模

NDS 无功规划若同时求解补偿点和容量，易陷入维数灾，可分解为两个子问题——补偿选点和容量配置。子问题间相互关联，单顺序优化未必全局最优、反馈循环优化、计算量大，使得顺序优化下的第一步补偿点优选十分关键。此外，不可控 DRG 出力及负荷需求随机性使得电压波动愈加剧烈，各节点调节需求差别较大，本文采用综合时序电压灵敏度法^[24]优化补偿选点，以得到更加契合各节点调节需求的无功源选址方案。

2.1 无功资源选址优化建模

2.1.1 SC 和 DSTATCOM 选址设计

并联电容器组主要为系统提供无功功率，有效提高电能质量并降低网损，其接入位置选择与容量配置相对灵活。

DSTATCOM 调节效果好、成本高，配置点主要为规模较大的微电网、DRG 并网点、长馈线末端或近末端/重负载关键节点以及电能质量问题严重的大用户接入点等^[20]，结合其斜率控制特点整定参考电压，从而使并网点电压维持在预期范围，实际运行中一般不会频繁修改整定参数，维持长期运行电压恒定。因此，DSTATCOM 配置容量的同时也将待整定参考电压作为变量，协调优化配置与整定方案。配置点在潮流计算中视为 PV 节点，给定整定参考电压值，若超出调节范围则退化为 PQ 节点^[25]。

2.1.2 综合时序无功电压灵敏度

鉴于静态灵敏度仅体现给定时刻状态下无功-电压的变化关系，为保证所取补偿点在所有时刻综合结果最优，参考文献^[24]构建时序综合灵敏度。

$$\begin{cases} SEN_j = \frac{1}{M} \sum_{m=1}^M \sum_{t=1}^{24} S_{j,t}^- \cdot \lambda_{t,m} \\ \lambda_{t,m} = (N_{EX,t,m} + 1) \times \max |V_{i,t} - V_0| \end{cases} \quad (1)$$

式中： SEN_j 为 j 节点的综合时序无功-电压灵敏度； m 为模拟场景编号； M 为总模拟场景数； $S_{j,t}^-$ 为 j 节点在 t 时刻的综合静态灵敏度； $\lambda_{t,m}$ 为越限权重因子； $N_{EX,t,m}$ 为 t 时刻的整条馈线越限节点数； $\max |V_{i,t} - V_0|$ 为最大电压偏差，当 t 时刻无节点电压

越限时， $\lambda_{t,m}$ 的第一项值为 1。

不同时间段的灵敏度因电压偏移程度不同在综合计算中所占权重不同，电压偏移越严重、越限程度越恶劣，则灵敏度权重越大。为避免补偿冗余，对 SEN_j 较大的所有节点聚类分区，各分区内配置一个无功源以满足需求，配置点即为各分区内 SEN_j 最高的节点。

2.2 无功容量配置优化建模

NDS 无功规划优化目标为年成本 C_{Plan} 最小，包括：设备投资成本 C_{inv} 、维护费用 C_{om} 、运行成本 C_{opr} 、网损成本 C_{loss} 以及电压越限/波动导致设备损坏潜在成本 C_{v_flu} ，如式(2)所示。

$$C_{Plan} = C_{inv} + C_{om} + C_{opr} + C_{loss} + C_{v_flu} \quad (2)$$

C_{loss} 体现不同配置方案对目标函数的影响，由模拟运行过程中潮流计算确定，根据网损电价 p_{loss} 计算；SC 和 DSTATCOM 配置影响 C_{inv} 和 C_{opr} ，不同容量投资成本不同，且选址会影响潮流分布，从而影响运行成本，通常投资成本与容量线性相关，维护成本在使用年限内为常数，即

$$C_{inv} = \sum_{k=1}^K \alpha_k \cdot I_f + \frac{\eta_{SC} P_{SC}}{T_{SC}} + \frac{\eta_{DST} P_{DST}}{T_{DST}} \quad (3)$$

$$C_{om} = M_{SC} + M_{DST} \quad (4)$$

式中： α_k 为配置点 k 的配置标识，有配置取 1，反之取 0； K 为配置点总数； I_f 为固定投资^[20]； P_{SC} 和 P_{DST} 分别为 SC 和 DSTATCOM 的容量成本； T_{SC} 和 T_{DST} 为预期使用时间； η_{SC} 和 η_{DST} 分别为 SC 和 DSTATCOM 的容量系数； M_{SC} 和 M_{DST} 为日维护成本。设备配置差别将会显式地体现在 C_{inv} 中，并隐式地体现在 C_{opr} 中。 C_{opr} 体现系统整体调节能力，与无功规划和运行模拟均有关，是连接上下层的关键变量。

网损为 NDS 无功“规划-运行”的重要经济指标^[20]，无功设备合理配置支撑动态补偿优化潮流，降低网损，本文以全周期模拟运行总网损电量来表征给定配置方案对网损的影响。

$$C_{loss} = \sum_{m=1}^M \sum_{t=1}^T P_{m,t}^{loss} \cdot p_{loss} \Delta t \quad (5)$$

式中： $P_{m,t}^{loss}$ 为 t 时段的关口 m 损失功率； M 为关口总数； T 为运行模拟周期； Δt 为运行模拟时间粒度。

无功规划约束包括 DSTATCOM 补偿容量约束、SC 补偿组数约束和 SC 单组容量约束^[7]。

3 NDS 多时间电压调节运行模拟

3.1 NDS 电压调节资源精细化建模

不同类型无功设备运行特性与控制过程不同, 其效率、成本及建模方式有所差异, 本文注重对无功设备运行性能精细化建模, 例如: 稳态优化时对设备动作损耗进行建模; DRG 有功变化时对动态无功作用域进行建模; DSTATCOM 电压调节与潮流变化过程; 负荷功率因数调节、OLTC 调档过程建模等, 均纳入运行模拟。通过多类型稳态-动态无功资源精细化建模, 以全面体现其运行性能, 是 NDS 电压调节运行模拟的基础。

3.1.1 DSTATCOM 动态补偿特性

DSTATCOM 通过与系统交换无功功率维持并网点电压恒定, 达到调压目的, 设并网点 $n+1$ 的电压^[26]为

$$V'_{n+1} \angle \beta'_{n+1} = \angle V'_n \angle \alpha'_n - (R_b + jX_b) \times (I_b \angle \theta + I_D \angle \theta') \quad (6)$$

式中: V'_n 、 V'_{n+1} 分别为 DSTATCOM 接入后节点 n 、节点 $n+1$ 的电压; α'_n 、 β'_{n+1} 均为相应相角; R_b 、 X_b 为线路上的阻抗; I_b 为支路电流; θ 为电流 I_b 的相角。 I_D 为 DSTATCOM 输出的电流; θ' 为电流 I_D 的相角。仅考虑 DSTATCOM 无功出力, 输出为无功电流, 其相角为

$$\angle I_{DST} = \theta' = \frac{\pi}{2} + \beta'_{n+1} \quad (7)$$

可知, DSTATCOM 接入前, 节点 $(n+1)$ 电压 V_{n+1} 与前一个节点电压 V_n 以及线路上电压降落 ΔV 有关。

$$\begin{cases} V_{n+1} = V_n - \Delta V \\ \Delta V = (R_b + jX_b) \cdot I_b \end{cases} \quad (8)$$

接入后, 电压降落由无功电流进行补偿, 补偿后的电压降落 $\Delta V'$ 为支路电压降 ΔV_b 和 DSTATCOM 电压降 ΔV_D 之和。

$$\begin{cases} \Delta V' = \Delta V_b + \Delta V_D = (R_b + jX_b) \cdot I_b + (R_b + jX_b) \cdot I_D \\ V'_{n+1} = V'_n - \Delta V' \end{cases} \quad (9)$$

可知, 控制 DSTATCOM 补偿电流可有效补偿并网点电压, 即 $|V'_{n+1}| = |V'_n|$ 。

3.1.2 DFIG 风电机组动态无功调控特性

DFIG 风电机组基本结构见文献[15, 27-28], 其定子侧经变压器直接并网, 转子侧经由转子侧变换器和网侧变换器接入电网。

DFIG 定子侧无功调节范围为

$$\begin{cases} Q_{s,\max} = \text{Min}\{Q_{s,\max 1}, Q_{s,\max 2}\} \\ Q_{s,\min} = \text{Max}\{Q_{s,\min 1}, Q_{s,\min 2}\} \end{cases} \quad (10)$$

式中: $Q_{s,\max 1}$ 、 $Q_{s,\max 2}$ 为忽略定转子电阻, 转子侧最大电流约束下的定子侧无功调节界限; $Q_{s,\min 1}$ 、 $Q_{s,\min 2}$ 为考虑定子侧最大限制, 定子侧无功调节界限。网侧换流器无功调节能力主要受限于换流器容量 $S_{c,\max}$ 。

$$P_c^2 + Q_c^2 \leq S_{c,\max}^2 \quad (11)$$

式中: P_c 、 Q_c 分别为网侧变换器从电网输入的有功和无功功率。则网侧换流器无功极限最大值 $Q_{c,\max}$ 和最小值 $Q_{c,\min}$ 分别为

$$\begin{cases} Q_{c,\max} = \sqrt{S_{c,\max}^2 - \left(\frac{sP_m}{1-s}\right)^2} \\ Q_{c,\min} = -\sqrt{S_{c,\max}^2 - \left(\frac{sP_m}{1-s}\right)^2} \end{cases} \quad (12)$$

式中: s 为转差率; P_m 为输入机械功率, 由捕获风能决定。综合定子侧和网侧换流器无功调节能力, DFIG 机组无功调节极限见式(12), 不同有功输出下的无功调节范围 $[Q_{\max}, Q_{\min}]$ 为

$$\begin{cases} Q_{\max} = Q_{s,\max} + Q_{c,\max} \\ Q_{\min} = Q_{s,\min} + Q_{c,\min} \end{cases} \quad (13)$$

3.1.3 光伏逆变器动态无功补偿特性

光伏逆变器利用自身无功控制能力提供电压支撑, 可调范围与逆变器容量关系^[29]为

$$Q_{\max}^{PV} = \pm \sqrt{(S^{\text{inv}})^2 - (P^{\text{PV}})^2} \quad (14)$$

式中: Q_{\max}^{PV} 为逆变器最大无功出力; P^{PV} 为有功出力; S^{inv} 为逆变器容量, 约为额定有功容量的 1.0~1.1 倍。

3.1.4 网络重建建模

在 NDS 无功调节过程中, 通过控制开关状态改变网络拓扑, 可改变馈线功率流动, 实现节能降耗、均衡负荷, 成为解决出力特性迥异 DRG 大规模接入、“源-网-荷”时空动态匹配失衡等导致的 NDS 运行态势分析困难的重要手段^[30]。NDS 网络重构中须满足辐射性与连通性约束, 对此建立以节点 1 为源节点、拓扑结构与 NDS 保持一致的虚拟网络, 除源节点外其他节点虚拟负荷值为 1, 网络重构模型参见文献[31-33]。

3.2 NDS “源-荷”多尺度时序场景生成

本文建立基于数据驱动的 NDS 典型场景生成方法, 采用 K-means 聚类^[34-35], 从长期不同 DRG 透率、负荷密度、分布特性, 到短期不同典型场景、极端场景, 构建“源-荷”联合时序场景, 支撑在海量运行场景下对规划方案进行综合评估, 以提升运行管理水平和模拟运行效益。

DRG 渗透率和接入均衡度以及负荷密度和分

布特性作为规划关键指标，对于无功配置和运行模拟影响显著。

可用 DRG 装机容量占比表征其渗透率。

$$S_{\text{per}} = \frac{S_{\text{DRG}}}{S_{\text{L}}} \times 100\% \quad (15)$$

式中：\$S_{\text{per}}\$ 为 NDS 内新能源渗透率；\$S_{\text{L}}\$ 为总负荷；\$S_{\text{DRG}}\$ 为 DRG 总装机容量。

从接入位置、分布状况及单点渗透率入手，建立 DRG 接入均匀度指标，如式(16)所示。

$$J_{\text{DRG}} = \frac{D \times \sum_{n=1}^N (Z_n \times S_{n,\text{per}})}{S_{\text{per}}} \quad (16)$$

式中：\$J_{\text{DRG}}\$ 为 DRG 接入均匀度指标；\$Z_n\$ 为节点 \$b\$ 距离电源点的电气距离；\$D\$ 为各 DRG 接入点电气距离标准差；\$S_{n,\text{per}}\$ 为单节点的渗透率。

负荷密度具有典型时空特性，直接影响规划决策，构建的负荷密度指标为

$$l_{\text{unit},l} = \sum_{k=1}^K w_k \cdot p_{lk} \quad (17)$$

式中，\$l_{\text{unit},l}\$ 为第 \$l\$ 个供电分区综合负荷密度评估值，直接反映单元负荷密度水平，可依据第 \$l\$ 分区内的负荷 \$k\$ 密度特征值 \$p_{lk}\$ 和熵权 \$w_k\$ 进行综合评估。

实际应用中根据 NDS 实际发展需求，构建不同的 DRG 渗透率、分布均衡度、负荷密度组合，形成不同中长期规划场景。

3.3 NDS 无功电压运行模拟

3.3.1 无功优化目标函数

电压调节模拟以综合成本最小和无功分布最佳均衡为目标，获取经济性和可靠性双重效益。

1) 经济性优化目标

综合成本包括网损成本^[36-37]、DSTATCOM 和 DRG 无功调节成本，OLTC 损耗及动作成本、SCB 动作成本、遥控开关动作成本等，描述为

$$\min f_{\text{eco}}(\mathbf{x}) = \sum_{n=1}^N p_n \left\{ \sum_{t=1}^T [\pi_t \cdot (P_{\text{loss},t}^{\text{net}} + P_{\text{loss},t}^{\text{TC}}) + C_t^{\text{Q}}] \right\} \quad (18)$$

$$C_t^{\text{Q}}(\mathbf{x}) = \lambda^{\text{TC}} \cdot C_t^{\text{TC}}(x_t^{\text{TC}}) + \lambda^{\text{SC}} \cdot C_t^{\text{SC}}(x_t^{\text{SC}}) + \lambda^{\text{DRG}} \cdot C_{Q,t}^{\text{DRG}}(x_t^{\text{DRG}}) + \lambda^{\text{DST}} \cdot C_t^{\text{DST}}(x_t^{\text{DST}}) + \lambda^{\text{NR}} \cdot C_t^{\text{NR}}(x_t^{\text{NR}}) \quad (19)$$

式中：\$T\$ 为优化周期；\$t\$ 为时段编号；\$N\$ 为总场景集合；\$n\$ 为场景编号，\$p_n\$ 为场景 \$n\$ 概率；\$\mathbf{x}\$ 为控制变量矩阵，\$\mathbf{x} = [x_t^{\text{TC}}; x_t^{\text{SC}}; x_t^{\text{DRG}}; x_t^{\text{DST}}; x_t^{\text{NR}}]\$，\$x_t^{\text{TC}}\$、\$x_t^{\text{SC}}\$、\$x_t^{\text{DRG}}\$、\$x_t^{\text{DST}}\$、\$x_t^{\text{NR}}\$ 分别表示 OLTC 档位、SCB 投切状态、

DRG 无功出力、DSTATCOM 无功出力、遥控开关状态；\$P_{\text{loss},t}^{\text{net}}\$ 为系统网损，见文献[15]；\$P_{\text{loss},t}^{\text{TC}}\$ 为 OLTC 损耗；\$\pi_t\$ 网损电价；\$C_t^{\text{Q}}\$ 为无功调节总成本；\$C_t^{\text{TC}}\$、\$C_t^{\text{SC}}\$ 分别表示 OLTC 动作成本、SC 投切成本；\$C_{Q,t}^{\text{DRG}}\$、\$C_t^{\text{DST}}\$、\$C_t^{\text{NR}}\$ 分别表示 DRG 和 DSTATCOM 无功出力成本、遥控开关动作成本；\$\lambda^{\text{TC}}\$、\$\lambda^{\text{SC}}\$、\$\lambda^{\text{DRG}}\$、\$\lambda^{\text{DST}}\$、\$\lambda^{\text{NR}}\$ 分别为 OLTC、SCB、DRG、DSTATCOM 调压成本及网络重构成本权重系数，引导不同设备调用程度。

2) 网络重构无功均衡优化目标

通过网络重构可提升 NDS 系统内有功/无功负荷分布均衡性，使电压波动更加平稳，从而扩大系统安全裕度，避免功率波动使系统进入紧急状态甚至失稳，电压波动最小描述为

$$\min f_{\text{v,flu}} = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N |(U_{i,t} - U_{j,t})| \quad (20)$$

式中，\$U_{i,t}\$、\$U_{j,t}\$ 分别为馈线节点 \$i\$ 和 \$j\$ 的电压值。

3) 设备调压成本模型

DRG 有功/无功耦合，本文重点考虑其无功调节成本，包含损耗成本和机会成本。损耗成本源于逆变器消耗的有功功率，与输出无功功率呈线性关系；机会成本是 DRG 为扩大无功作用域、削减有功出力成本。

$$C_{Q,t}^{\text{DRG}} = \begin{cases} c_t \cdot Q_t^{\text{DRG}} & Q_t^{\text{DRG}} \leq Q_{t,\text{max}}^{\text{DRG}} \\ c_t \cdot Q_t^{\text{DRG}} + \pi_t \cdot \Delta P_t^{\text{DRG}} & Q_t^{\text{DRG}} > Q_{t,\text{max}}^{\text{DRG}} \end{cases} \quad (21)$$

式中：\$c_t\$ 为 DRG 无功出力成本系数，DIFG 风机和光伏逆变器取值不同；\$Q_t^{\text{DRG}}\$ 为 DRG 在 \$t\$ 时段的无功出力；\$Q_{t,\text{max}}^{\text{DRG}}\$ 为 DRG 在 \$t\$ 时段的最大无功出力；\$\Delta P_t^{\text{DRG}}\$ 为 DRG 在 \$t\$ 时段的弃风/弃光电量。

此外，OLTC 调压成本包括主变损耗和分接头动作成本和 OLTC 单次动作成本^[30]；SCB 投切成本、遥控开关动作成本等模型见文献[15]。

3.3.2 无功优化可靠性约束

“源-荷”多环节随机因素增加了 NDS 电压越限甚至失稳风险，动态无功储备成为电压稳定的重要保障，若稳态调节阶段调用过渡将导致动态无功作用域不足，削弱系统抗扰能力。因此，增加动态无功储备指标作为可靠性约束，描述为

$$\begin{cases} \sum_{g \in \varphi_{\text{RDG,DST}}} (Q_{\text{max},t}^g - Q_t^g) / Q_t^{\text{load}} \geq \varphi_Q^{\text{cap}} \\ \sum_{g \in \varphi_{\text{RDG,DST}}} (Q_t^g - Q_{\text{min},t}^g) / Q_t^{\text{load}} \geq \varphi_Q^{\text{ind}} \\ (Q_{\text{max},t}^g - Q_t^g) / Q_t^g \geq \varphi_Q^{g,\text{cap}} \\ (Q_t^g - Q_{\text{min},t}^g) / Q_t^g \geq \varphi_Q^{g,\text{ind}} \end{cases} \quad (22)$$

式中: Q_t^g 、 $Q_{\max,t}^g$ 、 $Q_{\min,t}^g$ 分别为动态无功源 g 在 t 时段的无功出力以及感性和容性无功极限; $\varphi_{\text{RDG_DST}}$ 为 DRG 和 DSTATCOM 集合; Q_t^{load} 为系统无功需求; φ_Q^{cap} 、 φ_Q^{ind} 分别为系统感性、容性动态无功储备指标; $\varphi_Q^{g,\text{cap}}$ 、 $\varphi_Q^{g,\text{ind}}$ 分别为单台设备动态感性、容性无功储备指标。

此外, 还需要考虑的约束有: 光伏逆变器有功/无功出力约束、DFIG 风电机组有功/无功出力约束; 网络重构次数和辐射结构约束; 潮流方程约束; 控制变量约束包括 OLTC 档位及单次动作约束、SCB 投切组数约束; 状态变量约束包括节点电压、联络线传输功率和功率因数、支路容量等约束^[15]。

4 NDS 无功“规划-运行”评价指标体系

从无功容量配置、控制策略、支撑能力等方面构建评价指标, 并基于多时序运行场景仿真结果, 评估“规划-运行”融合下的综合效益。

4.1 无功容量配置指标

无功容量配置指标主要针对 NDS 无功规划, 评价补偿总容量、设备单组配置及容量利用情况, 在运行过程中不可调。

1) 配变容量补偿率 C_{TCR}

配变低压侧集中补偿为常见无功补偿方式, 为评价配置是否满足相关导则, 定义为

$$C_{\text{TCR}} = \left(\frac{\sum_{i=1}^m C_i}{\sum_{i=1}^m S_i} \right) \times 100\% \quad (23)$$

式中: m 为配变台数; S_i 为第 i 台配变额定容量; C_i 为对应无功装置总容量。为充分保障 NDS 无功正常运行, 配变容量补偿率应维持在 20%~40% 内。

2) 单组容量配置不当率 C_{SCR}

C_{SCR} 主要评价电容器单组容量设置的合理性, 定义为

$$C_{\text{SCR}} = (N_{\text{SC}}/N_{\text{T}}) \times 100\% \quad (24)$$

式中: N_{T} 为 NDS 内所有考核点数据采集时刻数; N_{SC} 为 SC 无论如何投切都无法满足功率因数要求时刻数。 C_{SCR} 为 0, 表明 SC 容量配置合理; C_{SCR} 越大则对功率因数的满足程度越低, 须重新配置来提高补偿精度。

3) 设备闲置率 $\eta_{\text{unuse},k}$

“源-荷”功率大幅波动, 无功设备运行过程易出现重载、轻载甚至满载、空载情况, 为避免配置冗余或利用率低下, 定义了设备闲置率指标^[20]。

$$\eta_{\text{unuse},k} = 1 - \left(\frac{\sum_{t=0}^T Q_{k,t} \Delta t}{(C_{\text{DS},k} \cdot T)} \right) \quad (25)$$

式中: $Q_{k,t}$ 为配置点 k 在 t 时段的无功功率输出; $\eta_{\text{unuse},k}$ 反映配置点设备有效利用程度, 该指标越小, 闲置容量越少, 利用程度越高, 越大则闲置容量越严重。在初期规划时容量配置冗余, 不利于经济运行。

4.2 无功控制策略指标

无功调节能力主要从功率因数、电压质量的合格率进行评价, 相关导则已给出统计方法, 下面将详细介绍功率因数负荷匹配率、电压波动合格率、无功动作超标率 3 项指标。

1) 功率因数负荷匹配率 L_{PFLR}

功率因数是衡量无功控制能力的重要指标, 在 NDS 实际运行中, DRG 高渗透率接入、“源-荷”波动幅频增加, 导致重载-轻载频繁变换, 需要衡量轻重载下功率因数不同考核要求的满足程度。

$$L_{\text{PFLR}} = (N_{\text{PF}}/N_{\text{L}}) \times 100\% \quad (26)$$

式中: N_{L} 为 NDS 内运行过程中典型重载、轻载时刻数; N_{PF} 为相应时刻功率因数无法满足的时刻数。 L_{PFLR} 越低表明功率因数对负荷波动的匹配度越低, 无功调节能力不足或策略不当。

2) 电压波动合格率 U_{FQR}

合理的补偿措施可有效地维系线路电压水平, 构建电压波动合格率指标来评价无功补偿对 NDS 电压的影响。

$$U_{\text{FQR}} = (N_{\text{VQ}}/N_{\text{S}}) \times 100\% \quad (27)$$

式中: N_{S} 为数据采集点的个数; N_{VQ} 为电压波动范围符合要求个数。 U_{FQR} 越低说明无功控制能力越弱, 补偿措施无法维持区域电压水平。

3) 无功设备动作率 R_{OAR}

R_{OAR} 主要评价设备动作频繁程度, 衡量动作持续时间及触发机制, 判断无功控制策略是否合理。

$$R_{\text{OAR}} = \left(\frac{\sum_{t=1}^T N_{\text{OAR},t}}{N_{\text{C}} \cdot T} \right) \times 100\% \quad (28)$$

式中: N_{C} 为无功设备数目; $N_{\text{OAR},t}$ 为 t 时段的实际动作次数。显然, R_{OAR} 越高表明设备动作越频繁, 易发生调整、投切振荡对系统产生冲击, 需要在动作时间和触发设置方面进行改进。

4.3 无功支撑能力指标

1) 最大动态无功支撑能力

当 NDS 故障或负荷激增时, 电压水平下降, 需要额外动态无功出力支撑快速恢复到稳定状态, 无功源应具备稳态功率维持和扰后紧急无功支撑的

能力, 对此, 构建最大动态无功电压支撑能力评价指标, 反应动态无功输出极限情况。

$$\eta_s = \frac{Q_{s\text{fact}}}{Q_{\text{lim}}} \times 100\% \quad (29)$$

式中: $Q_{s\text{fact}}$ 为电压处于稳定边缘时的实际输出动态无功功率; Q_{lim} 为理论动态无功储备, 该指标反映系统在短期内应对负荷突增的支撑能力。

2) DRG 承载能力

DRG 大规模接入易引起 NDS 电压质量恶化并制约其消纳^[20, 38]。例如: 光伏正午出力高, 负荷恰处于较低状态, 容易造成局部过电压, 若危及系统安全, 需削减出力; DRG 出力高峰时段, 受变流器容量限制, 无功裕度不足, 需削减有功出力扩展无功作用域。为评估规划方案对新能源的承载能力, 利用消纳率 $\eta_{\text{consum}}^{\text{DRG}}$ 来表示。

$$\eta_{\text{consum}}^{\text{DRG}} = \frac{\sum_{k=1}^K \sum_{t=0}^T P_{k,t}^{\text{DRG}} - P_{cr,k,t}^{\text{DRG}} \cdot \Delta t}{\sum_{k=1}^K \sum_{t=0}^T P_{k,t}^{\text{DRG}} \cdot \Delta t} \times 100\% \quad (30)$$

式中, $P_{k,t}^{\text{DRG}}$ 、 $P_{cr,k,t}^{\text{DRG}}$ 分别为节点 k 处的 DRG 在 t 时段的可发电功率和弃电功率。

5 NDS “规划-运行” 协同优化模型求解

NDS 无功配置和电压调节问题呈非线性、多约束、设备特性迥异等特征。上下层决策变量包含整型变量(选址 0-1 变量, SCB 安装与投运整型变量、联络开关控制 0-1 变量)和连续变量(DSTATCOM、DRG 逆变器无功调节), 属于混合整数规划问题, 且上下层之间相互作用, 求解难度显著增加。常规算法难以胜任, 可采用智能算法。深度强化学习等新型人工智能算法更加适用于多随机因素下的“离散学习和在线应用”实时优化场景。对此本文采用非支配排序遗传算法(NSGA-II)求解^[39]。

上层配置约束相对简单, 包括安装位置、容量等; 下层运行模拟相对复杂, 约束包含非线性潮流计算, 特别是系统较复杂时, 计算量急剧增加且与变量维度相关, 为满足可解性及开关动作次数限制, 降低时域耦合关系, 进行时段合并, 对于 OLTC 动作、DSTATCOM 整定转换为分时段静态动作以压缩变量空间。采用精英保留策略^[40], 避免交叉、变异等遗传操作随机性破坏优秀染色体。NSGA-II 算法流程如图 3 所示。

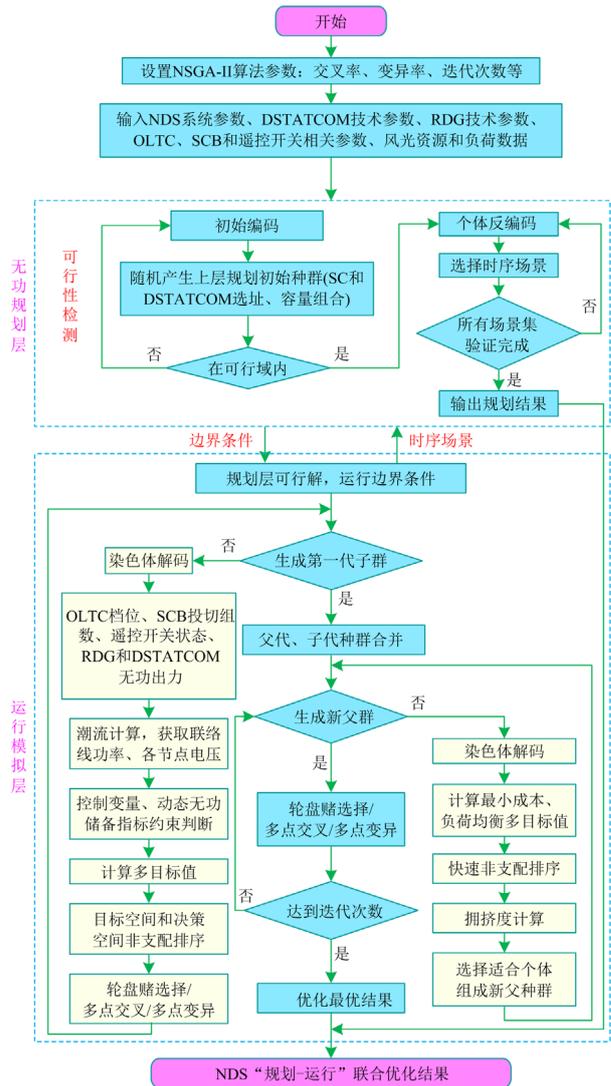


图 3 NDS “运行-规划” 联合优化 NSGA-II 求解流程

Fig. 3 NDS "operation-planning" joint optimization NSGA-II solution process

6 算例分析

本文采用调整后的 IEEE33 节点配网系统(PyPower “case33bw”实例)进行仿真分析。其中, 基准值 $S_B = 10 \text{ MVA}$, $U_B = 12.66 \text{ kV}$; OLTC 二次侧电压调节范围为 $0.90 \sim 1.1 \text{ p.u.}$, 步长为 0.125 p.u. ; 节点 17、29 接入光伏发电, 节点 6、11 接入双馈风机, 均可参与无功电压调节。运行模拟中, 可改变联络开关(S1—S6)及其所构成回路中分段开关通断进行重构各无功资源安装及运行成本, 如表 1 所示。

6.1 “源-荷” 多时序联合场景分析

典型场景生成是开展 NDS 无功“规划-运行”分析的基础。对此, 综合考虑未来新能源渗透率为

20%、30%、40%和负荷新增 10%、20%、30%等不同发展阶段预测, 以我国华东沿海地区年度风速和光照为原始数据。负荷根据该地区实际数据同比例增加以模拟中长期发展规划, 然后基于 K-means 聚类结果合并形成典型场景, 进行“规划-运行”联合仿真分析。共得到 21 种“源-荷”联合时序典型场景情况, 见附录 A 表 A1, 部分功率曲线见图 4。

表 1 无功资源安装及运行成本

资源名称	类型	成本
OLTC	动作成本/(元/次)	100
OLTC	无功成本/(元/Mvar)	10
可投切SC	安装成本/(元/Mvar)	20 000
可投切SC	年维护费用/(元/Mvar)	12 000
可投切SC	无功成本/(元/Mvar)	10
可投切SC	投切成本/(元/次)	20
DSTATCOM	安装成本/(元/Mvar)	70 000
DSTATCOM	年运维成本/(元/Mvar)	5000
DSTATCOM	电压整定成本/(元/次)	80
DSTATCOM	无功成本/(元/Mvar)	40
DRG	无功成本/(元/Mvar)	40
联络开关	动作成本/(元/次)	1000

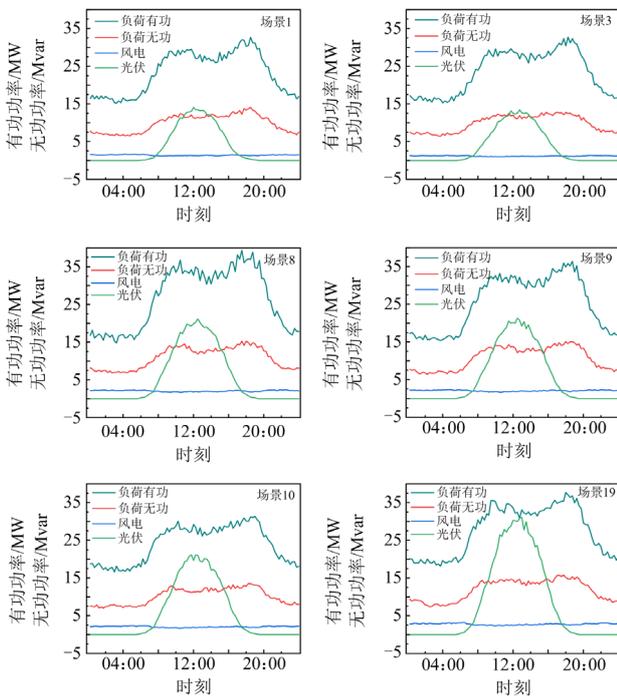


图 4 “源-荷”典型时序场景功率曲线

Fig. 4 Typical timing scenario of "source-load"

上述“源-荷”多时序联合场景仅考虑区域配网内整体性时序分布规律, 在实际分析计算过程中, 将融入 DRG 接入均衡度、负荷密度等对无功资源

配置和模拟运行控制方案的影响。

6.2 多类型无功资源优化配置分析

6.2.1 节点电压灵敏度与无功配置选址分析

求得系统中各电压节点综合灵敏度数值如图 5 所示, 其值绝对值越大代表节点越薄弱, 表明在这些节点施加无功补偿装置可以取得较好的效果, 可知, 节点 25、22、18、8 的数值绝对值最大, 分别为 -0.1129、-0.0912、-0.0865、-0.0675, 将成为后续无功资源值的候选集, 所形成的补偿聚类分区如图 6 所示。

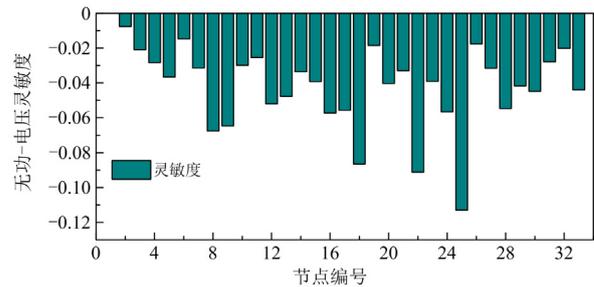


图 5 IEEE33 节点系统无功-电压综合灵敏度

Fig. 5 IEEE33 system reactive-voltage integrated sensitivity

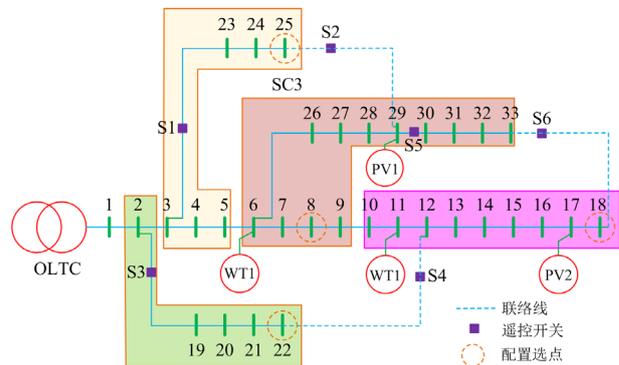


图 6 NDS 无功资源配置选址

Fig. 6 NDS reactive power resource allocation and location

6.2.2 多时序“源-荷”场景下的无功资源配置分析

本文选取新能源 30%渗透率和负荷增长 20%的源荷正常场景, 即以场景 8 为例进行分析。根据 NDS 内稳态和静态无功补偿装置的运行特性, 分为如下配置情形: 情形 1 只配置电容器、不配置 DSTATCOM; 情形 2 只配置 DSTATCOM、不配置电容器; 情形 3 配置电容器和 DSTATCOM。规划结果及年费用比较如表 2、表 3 所示。

分析表 2、表 3 可知: 情形 1 规划的无功资源总容量最高, 情形 2 配置容量最低, 是由于情形 1 主要为传统的 SC, 成本较低, 且属于稳态调节需要更为充足的容量, 以配合其他动态无功资源调节电

压；相比之下情形 2 配置中 DSTATCOM 成本高且为动态无功资源，有利于提升补偿灵活性，对总容量需求降低；情形 3 为前两种情形的合理折中，且通过 SC 和 DSTATCOM 的合理搭配，更有利于稳态和动态无功资源在实际运行调控中的协调配合。

表 2 电容器与 DSTATCOM 规划结果

情形	SC接入位置	SC接入容量/Mvar	DSTATCOM接入位置	DSTATCOM接入容量/Mvar
1	25, 22, 18, 8	4, 6, 8, 6	—	—
2	—	—	18, 22, 25	8, 6, 4
3	22, 25, 8	4, 4, 4	18	10

表 3 无功资源规划方案费用

情形	总费用	投资费用	运行费用	万元
				维护费用
1	106.55	48	34.2	24.35
2	173.81	126	13.43	34.38
3	140.68	94	18.33	28.35

从规划运行成本而言，与情形 2 相比，情形 1 的投资费用明显降低，但运行成本明显增加，这是由于 SC 不支持动态调压，无法实时响应系统动态调节需求，导致系统网损、新能源消纳受限；相比之下，情形 2 的 DSTATCOM 配置增加了投资和维护成本，但运行成本明显降低。相比之下，情形 3 的总成本和运行成本处于折中，且各项电压指标也较为理想。在实际配置和运行中，需要根据无功电压控制目标合理选择配置方案。

此外，从配置位置来看，DSTATCOM 更多地配置在节点 22、18 上，这是由于节点 22 和 18 所处支路最长且为末端，周边负荷以商业、居民负荷为主，DRG 分布也较为密集，无功电压波动较大，特别是在重载时段电压跌落较为明显，需要更多动态无功支持。此外，节点 25 更多的配置了 SC，是由于所在支路主要为工业密集区，无功负荷相对平稳，对大容量稳态无功资源需求更多。

6.3 “源-荷”典型时序场景电压调节运行模拟分析

本文在无功规划中考虑中长期发展需求和实际运行状态，选取新能源渗透率 30%和负荷增长 20%下的 3 种具有典型代表性的“源-荷”联合场景开展运行模拟，验证了无功配置对极端场景的有效性，并分析了 OLTC、SC、DRG、DSTATCOM 等资源控制方式对配置结果的影响：① 负荷需求与 DRG 出力正常场景，即负荷/DRG 出力比值正常，

选场景 8；② 高负荷低 DRG 出力场景，即负荷/DRG 出力比值最大，选场景 9；③ 低负荷高 DRG 出力场景，即负荷/DRG 出力比值最小，选场景 10。运行模拟中多类型无功设备配置参数如表 2 中的情形 3。

NDS 系统中负荷变化规律性较强，而风电、光伏发电随机性强，特别是在高比例接入下成为影响 NDS 运行的主要因素。图 7—图 11 分别给出网络重构、电压波动、电容器投切和 DRG、DSTATCOM 无功出力优化结果。

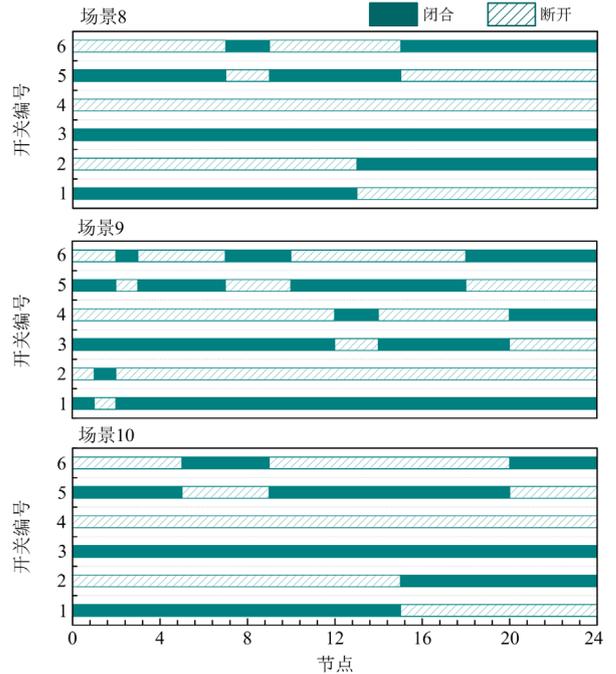


图 7 网络重构优化结果

Fig. 7 Network reconstruction optimization result

从图 7 可知，遥控开关全程动作次数分别为 4、10、4，在一定程度上保证了系统运行方式的稳定性。同时，通过网络重构，将夜间风电功率合理转移，特别是场景 2 负荷激增场景下，通过多次网络重构提升各节点源荷均衡水平，有效改善局部电压越限问题，同时在重载时融合 SC、DSTATCOM、DRG 多类型无功补偿对电压支撑的作用，最终使得优化周期内系统电压波动幅度显著减小，最大电压幅值差仅为 0.09 p.u.。

从图 9 可以看出，电容器作为可控稳态无功源，在 DRG 有功出力高、无功出力可调范围不足时，明显增加投切组数，支撑大容量就地补偿。例如：场景 10 中的 10:00—12:00，因光伏发电有功出力较大导致无功调节能力较小，电容器保持最大投切组数来补充无功功率。

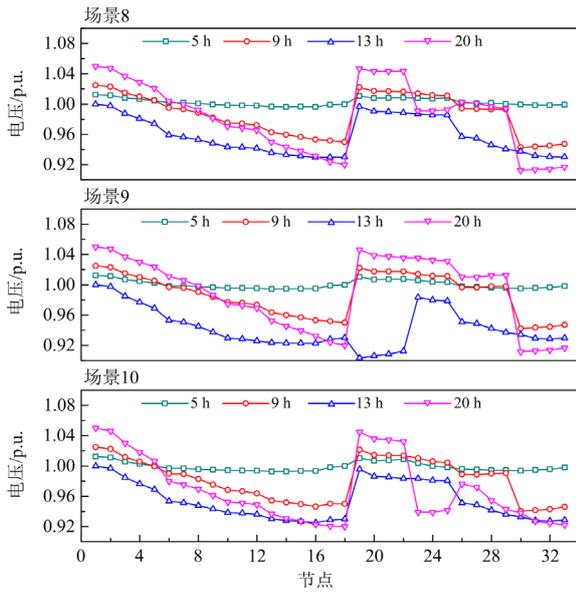


图 8 各典型时段节点电压
Fig. 8 Node voltage for each typical period

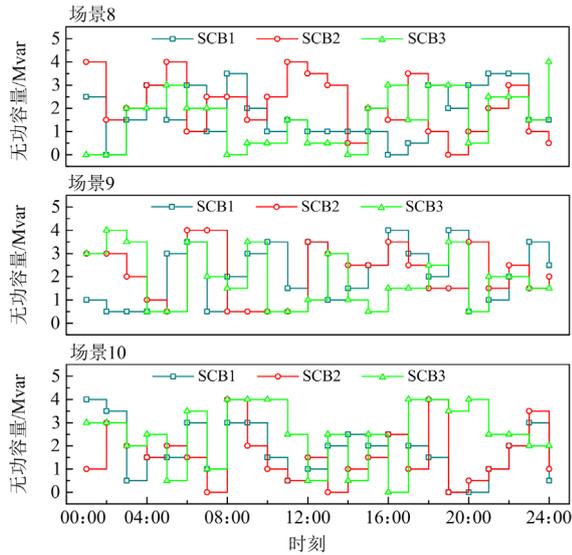


图 9 电容器组优化结果
Fig. 9 Capacitor bank optimization results

从图 10 中可以看出,光伏发电虽然可为系统提供有功和无功支撑,但在某些时段其有功/无功出力大小与负荷高低并不匹配,特别是在 09:00—11:00 和 14:00—16:00 负荷高峰时段,光伏有功出力已超额定功率的 80%,尽管一定程度上缓解了供电压力,通过就地消纳有效降低网损和电压跌落,但导致光伏逆变器无功裕度明显不足;在 19:00—23:00 负荷晚高峰时段,光伏无有功出力输出,可通过增加无功出力,缓解电压跌落,并有效降低线损,从而从有功出力和无功出力联合方面支撑 NDS 电压

稳定和节能降损,未来随着“整县光伏”政策持续推进,DRG 高渗透率下 NDS 运行过程中,该现象将会更加明显。

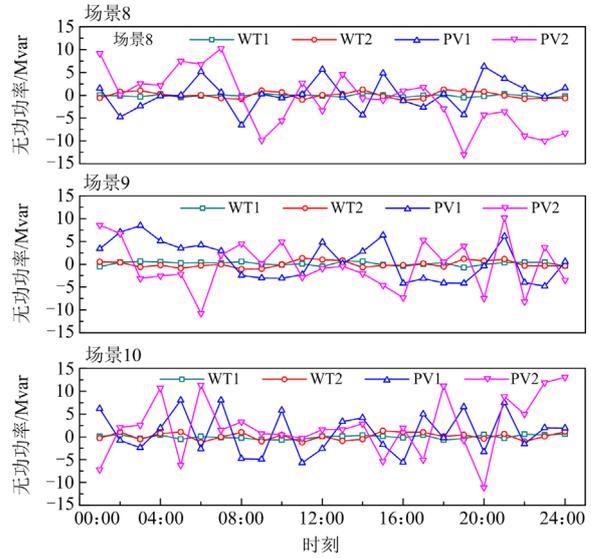


图 10 DRG 无功出力优化结果
Fig. 10 DRG reactive power optimization results

从图11可知, DSTATCOM接入节点18,处于长馈线末端,可有效提升末端电压,特别是在风光出力较低的06:00—10:00时段,此时段高渗透率光伏有功支撑较弱,为防止节点电压跌落,增加无功补偿力度;而在负荷较重且波动幅较高的19:00—21:00时段,调用更多的SC稳态无功资源,从而预留光伏逆变器动态无功裕度,响应“源-荷”大范围波动对快速电压调整的需求。

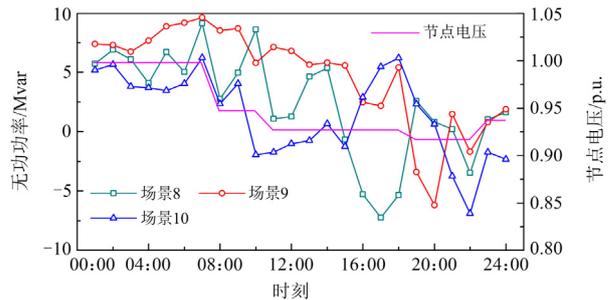


图 11 DSTATCOM 无功出力优化结果
Fig. 11 DSTATCOM reactive power optimization results

综上可知,在 OLTC、SCB、网络重构和 DRG、DSTATCOM 协调配合下,各典型时段均未出现电压越限问题,且 3 种场景下的优化结果具有相似规律性。全过程电容器投切变化相对平稳,承担更多稳态无功补偿,对于功率波动导致的电压波动,则由动态无功备用资源来承担,通过风电反调峰、光伏白天集

中发电昼夜差形成的无功裕度互补，与 DSTATCOM 协调配合，在全周期内满足系统电压调节需求，并预留充足动态无功储备，响应系统运行状态变化。

6.4 NDS 无功资源“规划-运行”综合效益评估

NDS 中新能源出力以及负荷功率不确定性使得系统运行方式多变，特别是新能源渗透率较高情况下的极端场景。为提升无功资源优化配置的合理性，基于表 A1 中长期下不同渗透率和短期内不同

“源-荷”变化(特别是极端天气)形成的多时序场景开展运行模拟验证，并基于第 4 节构建的评价指标开展综合效益评估。其中，场景 1—7 配置 SC 为 10 Mvar，DSTATCOM 为 7 Mvar；场景 8—14 配置 SC 为 12 Mvar，DSTATCOM 为 10 Mvar；场景 15—21 配置 SC 为 14 Mvar，DSTATCOM 为 12 Mvar，评估结果见表 4。

表 4 多时序场景下的运行模拟结果

Table 4 Operation simulation results under multiple timing scenarios

场景	配变容量 补偿率/%	单组容量配置 不当率/%	功率因数负荷 匹配率/%	电压波动 合格率/%	网络重构 次数	静态无功设备 使用率/%	动态无功设备 使用率/%	新能源 消纳率/%
1	28.5	0.65	97.32	100	3	47.65	49.14	100
2	28.5	1.01	96.83	99.98	4	45.67	45.45	100
3	28.5	0.56	97.27	100	2	53.44	39.05	100
4	28.5	1.39	96.85	99.97	2	44.54	43.23	100
5	28.5	0.8	97.4	100	3	48.78	39.022	100
6	28.5	0.67	97.4	100	4	40.67	46.78	100
7	28.5	11.61	86.37	99.43	2	53.89	51.89	100
8	31.6	0.55	97.43	100	4	49.14	48.04	100
9	31.6	6.91	91.13	99.68	10	50.86	44.15	97.8
10	31.6	0.61	97.2	100	4	45.79	39.022	100
11	31.6	0.98	96.85	99.98	2	44.74	43.27	100
12	31.6	1.38	96.5	99.96	6	49.04	42.032	99.6
13	31.6	0.74	97.2	100	5	41.23	48.67	100
14	31.6	11.87	86.18	99.43	6	54.46	50.679	97.54
15	33.8	1.18	96.86	99.98	5	47.9	48.04	99.78
16	33.8	7.43	90.74	97.66	11	46.46	44.15	95.65
17	33.8	1.1	96.89	99.98	6	54.17	39.022	98.89
18	33.8	1.46	96.54	98.96	4	45.17	43.23	100
19	33.8	1.05	96.79	99.38	5	49.55	41.08	99.56
20	33.8	1.16	96.88	99.47	3	41.29	48.87	99.89
21	33.8	12.14	89.84	98.41	8	54.34	53.56	97.54

从表 4 中可知，从场景 1—7 到场景 8—14，再到场景 15—21，随着新能源渗透率不断增加，相应的无功补偿容量也逐渐提升，但新能源消纳率和电压波动合格率明显降低，是由于在进行无功电压调节过程中，新能源渗透率的提升，特别是达到 40% 时装机容量将超过最大负荷，尤其是分布式光伏在午时集中高发，一方面导致难以消纳，另一方面光伏在新能源总占比较高，高发时段影响无功调节，导致灵活性动态无功容量不足，个别时段只能选择剪切部分有功来提升动态无功作用域。

从网络重构动作次数而言，随着 NDS 内负荷增长及新能源渗透率提升，功率波动将大幅增加，导致网络负载时变非均衡分布特征逐步明显，需要联络线开关频繁切换重构网络以均衡有功无功分布。

从静态、动态无功设备使用情况而言，基本上保持在 50% 左右，这也与负荷率水平相一致，即在高峰重载时段无功设备大量投入使用，低谷时段将有一定的闲置，这也使得 NDS 有功无功联合运行模拟成为必需，从有功负荷跨时域平移和无功分布跨空间域均衡的角度提升总体效益。聚焦分析场景 8—10 在静态、动态无功资源调用情况可知，场景 9 静态无功设备使用率最高，而动态设备相对于场景 8 略低，这是由于场景 9 为负荷激增，需要大量静态无功设备投入来满足大容量需求。相比之下，场景 10 在静态和动态无功设备使用方面均明显较低，主要是由于负荷骤减、无功需求降低、内部动态无功资源较为充足。

7 结论

本文面向未来大规模分布式新能源接入NDS带来的无功电压问题,基于“规划-运行”融合框架将两种不同时间尺度问题结合起来进行考虑,构建多类型无功补偿资源协调配置双层优化模型。本文所提框架思路可弥补已有研究成果中无功资源规划、运行割裂优化的缺陷,在确保NDS运行经济性的同时提高了电压质量和对分布式新能源的自消纳水平,降低了功率倒送对上级电网的影响,适应了未来负荷峰谷差逐渐拉大、新能源渗透率逐步提升的区域配电系统发展趋势。

附录 A

表 A1 “源-荷”联合多时序场景
Table A1 “Source-load” joint multiple time series scenarios

场景	最大负荷/ MW	最大风电 出力/MW	最大光伏 出力/MW	平均 天数	出现 概率/%	源侧描述	描述
1	32.37	1.304	13.02	142.28	38.98	渗透率 20%, 正常	负荷增长 10%, 正常
2	34.98	1.345	12.98	18.58	5.09	渗透率 20%, 正常	负荷增长 10%, 突增
3	30.87	1.323	12.87	18.91	5.18	渗透率 20%, 正常	负荷增长 10%, 骤减
4	30.32	1.456	8.416	61.21	16.77	渗透率 20%, 风大光小	负荷增长 10%, 正常
5	30.37	0.732	13.60	64.90	17.78	渗透率 20%, 风小光大	负荷增长 10%, 正常
6	31.31	0.732	8.416	38.47	10.54	渗透率 20%, 风小光小	负荷增长 10%, 正常
7	30.54	1.551	13.65	20.66	5.66	渗透率 20%, 风大光大	负荷增长 10%, 正常
8	34.23	2.278	20.02	134.32	36.80	渗透率 30%, 正常	负荷增长 20%, 正常
9	36.87	2.278	20.02	12.78	3.50	渗透率 30%, 正常	负荷增长 20%, 突增
10	32.13	2.278	20.02	19.42	5.32	渗透率 30%, 正常	负荷增长 20%, 骤减
11	34.23	2.543	12.94	71.18	19.50	渗透率 30%, 风大光小	负荷增长 20%, 正常
12	34.23	1.278	20.92	64.97	17.80	渗透率 30%, 风小光大	负荷增长 20%, 正常
13	34.23	1.278	12.94	41.90	11.48	渗透率 30%, 风小光小	负荷增长 20%, 正常
14	34.23	2.543	20.92	20.44	5.60	渗透率 30%, 风大光大	负荷增长 20%, 正常
15	36.87	3.11	30.05	131.00	35.89	渗透率 40%, 正常	负荷增长 30%, 正常
16	41.67	3.06	30.08	21.10	5.78	渗透率 40%, 正常	负荷增长 30%, 突增
17	34.69	3.10	30.47	21.10	5.78	渗透率 40%, 正常	负荷增长 30%, 骤减
18	37.23	3.47	19.71	69.28	18.98	渗透率 40%, 风大光小	负荷增长 30%, 正常
19	36.88	1.74	31.95	61.25	16.78	渗透率 40%, 风小光大	负荷增长 30%, 正常
20	37.27	1.73	19.63	40.66	11.14	渗透率 40%, 风小光小	负荷增长 30%, 正常
21	37.25	3.46	31.42	20.62	5.65	渗透率 40%, 风大光大	负荷增长 30%, 正常

参考文献

- [1] 张勇军, 羿应棋, 李立涅, 等. 新型低压配电系统特征、关键问题与技术展望[J]. 电力系统自动化, 2022, 46(22): 1-12.
ZHANG Yongjun, YI Yingqi, LI Licheng, et al. Characteristics, key problems and technology prospect of new type low-voltage distribution system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2022, 46(22): 1-12.
- [2] 董旭柱, 华祝虎, 尚磊, 等. 新型配电系统形态特征与技术展望[J]. 高电压技术, 2021, 47(9): 3021-3035.
DONG Xuzhu, HUA Zhuhu, SHANG Lei, et al. Morphological characteristics and technology prospect of new distribution system[J]. High Voltage Engineering, 2021, 47(9): 3021-3035.
- [3] YIN L, TAO M. Balanced broad learning prediction model for carbon emissions of integrated energy systems

鉴于篇幅有限,本文暂未考虑运行模拟中的实时调控和反馈校正策略,在一定程度上限制规划方案对个别极端场景的适用性,未来将进一步建立“离线学习+在线应用”电压调节方案,逐步形成“模型+数据”驱动相结合的全景时序运行模拟,以提升无功电压调节控制精度。除此之外,随着NDS逐步发展建设,大量分布式储能设备、新型可调/可控负荷等将不断接入,从而丰富了其“源-网-荷-储”全环节无功资源,使得考虑有功无功联合优化,以及基于负荷特性分析的用户侧无功资源参与NDS无功补偿与电压调节,成为其无功“规划-运行”领域的发展新方向。

- considering distributed ground source heat pump heat storage systems and carbon capture & storage[J]. Applied Energy, 2023, 329.
- [4] HUI D, SHEN P, WAI S, et al. Perspective and analysis of ammonia-based distributed energy system (DES) for achieving low carbon community in China[J]. iScience, 2022, 25(10).
- [5] 李征, 王文宾, 韩胜峰, 等. 考虑无功支撑的分布式光伏接入配电网电压适应性研究[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(11): 32-41.
LI Zheng, WANG Wenbin, HAN Shengfeng, et al. Voltage adaptability of distributed photovoltaic access to a distribution network considering reactive power support[J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(11): 32-41.
- [6] 马钊, 张恒旭, 赵浩然, 等. 双碳目标下配用电系统的新使命和新挑战[J]. 中国电机工程学报, 2022, 42(19): 6931-6945.
MA Zhao, ZHANG Hengxu, ZHAO Haoran, et al. New mission and challenge of power distribution and consumption system under dual-carbon target[J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(19): 6931-6945.
- [7] 任泓宇, 王主丁, 张永斌, 等. 计及技术标准的高压配电网无功优化规划[J]. 电网技术, 2020, 44(4): 1463-1473.
REN Hongyu, WANG Zhuding, ZHANG Yongbin, et al. Reactive power optimization planning of high-voltage distribution networks with technical standards being considered[J]. Power System Technology, 2020, 44(4): 1463-1473.
- [8] 徐艳春, 蒋伟俊, 汪平, 等. 考虑暂态电压稳定的含高渗透率风光的电网动态无功规划方法[J]. 电力自动化设备, 2022, 42(8): 79-88.
XU Yanchun, JIANG Weijun, WANG Ping, et al. Dynamic reactive power planning method for power grid with high permeability wind power and photovoltaic considering transient voltage stability[J]. Electric Power Automation Equipment, 2022, 42(8): 79-88.
- [9] 刘亨铭, 江畅, 程启明, 等. 不平衡电网下基于无源控制的MMC-UPQC电能质量综合治理研究[J]. 高电压技术, 2021, 47(4): 1344-1355.
LIU Hengming, JIANG Chang, CHENG Qiming, et al. Research on integrated management of MMC-UPQC power quality based on passivity control under unbalanced grid[J]. High Voltage Engineering, 2021, 47(4): 1344-1355.
- [10] 廖建权, 周念成, 王强钢. 辐射型双极直流配电网不平衡电压分析及抑制[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(18): 5380-5388.
LIAO Jianquan, ZHOU Niancheng, WANG Qianggang. Analysis and suppression of unbalanced voltage in radiant bipolar DC distribution network[J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(18): 5380-5388.
- [11] 张之昊, 武建文, 李平, 等. 应用于农村配电网的测量点与补偿点分离式无功补偿设备及其优化配置[J]. 电工技术学报, 2015, 30(3): 205-213.
ZHANG Zhihao, WU Jianwen, LI Ping, et al. Reactive power compensation and its optimal allocation with measurement part and compensation part separated in rural power grid[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(3): 205-213.
- [12] 李斌, 吕林, 刘友波, 等. 考虑光伏接入不确定性的主动配电网有功-无功可控资源优化配置[J]. 电网技术, 2017, 41(2): 355-365.
LI Bin, LÜ Lin, LIU Youbo, et al. Optimal configuration of controllable active-reactive power resources in active distribution network considering photovoltaic access uncertainty[J]. Power System Technology, 2017, 41(2): 355-365.
- [13] 李鹏, 赵亚汝, 范须露, 等. 适用于规划-运行两阶段的配电网可靠性等级划分及评估方法[J]. 高电压技术, 2022, 35(2): 1-12.
LI Peng, ZHAO Yaru, FAN Xulu, et al. Reliability classification and evaluation method of distribution network suitable for planning-operation two stages[J]. High Voltage Engineering, 2022, 35(2): 1-12.
- [14] 朱瞳彤, 顾洁, 金之俭, 等. 规划与运行融合的配电网无功补偿智能协调配置[J]. 电力自动化设备, 2019, 39(2): 36-43.
ZHU Tongtong, GU Jie, JIN Zhijian, et al. Intelligent harmonious collocation for reactive power compensation of distribution network combining planning and operation[J]. Electric Power Automation Equipment, 2019, 39(2): 36-43.
- [15] 颜湘武, 徐韵, 李若瑾, 等. 基于模型预测控制含可再生分布式电源参与调控的配电网多时间尺度无功动态优化[J]. 电工技术学报, 2019, 34(10): 2022-2037.
YAN Xiangwu, XU Yun, LI Ruojin, et al. Multi-time scale reactive power optimization of distribution grid based on model predictive control and including DRG regulation[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2019, 34(10): 2022-2037.
- [16] TANVIR A A, MERABET A, BEGUENANE R. Real-time control of active and reactive power for doubly fed induction generator (DFIG)-based wind energy conversion system[J]. Energies, 2015(8): 10389-10408.
- [17] 王耀翔, 戴朝波, 杨志昌, 等. 考虑风电机组无功潜力的风电场无功电压控制策略[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(24): 83-90.
WANG Yaoxiang, DAI Chaobo, YANG Zhichang, et al.

- Voltage control strategy for a wind farm considering the reactive capability of DFIGs[J]. *Power System Protection and Control*, 2022, 50(24): 83-90.
- [18] 徐博涵, 向月, 潘力, 等. 基于深度强化学习的含高比例可再生能源配电网就地分散式电压管控方法[J]. *电力系统保护与控制*, 2022, 50(22): 100-109.
XU Bohan, XIANG Yue, PAN Li, et al. Local decentralized voltage management of a distribution network with a high proportion of renewable energy based on deep reinforcement learning[J]. *Power System Protection and Control*, 2022, 50(22): 100-109.
- [19] 符杨, 缪润利, 李振坤, 等. 计及时序特性的主动配电网无功电源规划[J]. *电力自动化设备*, 2017, 37(8): 12-19.
FU Yang, MIAO Runli, LI Zhenkun, et al. Reactive-power planning based on time-sequence characteristics of active distribution network[J]. *Electric Power Automation Equipment*, 2017, 37(8): 12-19.
- [20] 赖宇阳, 肖勇, 郑楷洪, 等. DSTATCOM配置与整定的多目标协调优化[J]. *电力科学与技术学报*, 2020, 35(1): 61-67.
LAI Yuyang, XIAO Yong, ZHENG Kaihong, et al. multi objective coordinated optimization of DSTATCOM configuration and setting in distribution network[J]. *Journal of Electric Power Science and Technology*, 2020, 35(1): 61-67.
- [21] 刘自发, 张婷, 王岩. 基于模型预测控制的主动配电网多场景变时间尺度优化调度[J]. *电力自动化设备*, 2022, 42(4): 121-128.
LIU Zifa, ZHANG Ting, WANG Yan. Multi-scenario variable time scale optimal scheduling of active distribution network based on model predictive control[J]. *Electric Power Automation Equipment*, 2022, 42(4): 121-128.
- [22] 韩肖清, 李廷钧, 张东霞, 等. 双碳目标下的新型电力系统规划新问题及关键技术[J]. *高电压技术*, 2021, 47(9): 3036-3046.
HAN Xiaoqing, LI Tingjun, ZHANG Dongxia, et al. New issues and key technologies of new power system planning under double carbon goals[J]. *High Voltage Engineering*, 2021, 47(9): 3036-3046.
- [23] NIU Geng, JI Yu, ZHANG Zhihui, et al. Clustering analysis of typical scenarios of island power supply system by using cohesive hierarchical clustering based K-means clustering method[J]. *Energy Reports*, 2021, 7(S6).
- [24] 孙笑雨, 于源, 孟垂懿, 等. 考虑大规模光伏和风电接入的主动配电网无功电源综合规划[J]. *智慧电力*, 2020, 48(9): 16-22.
SUN Xiaoyu, YU Yuan, MENG Chuiyi, et al. Comprehensive planning of reactive power supply for active distribution network accessed with large-scale photovoltaic and wind power[J]. *Smart Power*, 2020, 48(9): 16-22.
- [25] 隋兴嘉, 肖勇, 郑楷洪, 等. 光储与DSTATCOM协同运行及定容[J]. *电力电容器与无功补偿*, 2017, 38(6): 150-157.
CUI Xingjia, XIAO Yong, ZHENG Kaihong, et al. Coordinative operation and capacity allocation of photovoltaic-storage and DSTATCOM systems[J]. *Power Capacitor & Reactive Power Compensation*, 2017, 38(6): 150-157.
- [26] 余利. 含分布式电源和电动汽车的DSTATCOM的优化配置研究[D]. 宜昌: 三峡大学, 2020.
YU Li. Research on optimal configuration of DSTATCOM with distributed power supply and electric vehicle[D]. Yichang: Three Gorges University, 2020.
- [27] 黄云辉, 王凌云, 喻恒凝, 等. 弱电网下双馈风力发电系统的稳定性极限研究[J]. *电力工程技术*, 2022, 41(4): 9-17.
HUANG Yunhui, WANG Lingyun, YU Hengning, et al. Stability limit of double-fed induction generator system connected to weak grid[J]. *Electric Power Engineering Technology*, 2022, 41(4): 9-17.
- [28] 王若谷, 张若微, 王明杰, 等. 提升双馈风力发电系统低电压穿越能力的跟踪控制方法[J]. *电力工程技术*, 2021, 40(2): 185-191.
WANG Ruogu, ZHANG Ruowei, WANG Mingjie, et al. A tracking control method for doubly-fed induction generator to enhance the low voltage ride through capability[J]. *Electric Power Engineering Technology*, 2021, 40(2): 185-191.
- [29] 齐金山, 姚良忠, 廖思阳, 等. 高比例新能源电力系统静态电压稳定裕度在线概率评估[J]. *电力系统保护与控制*, 2023, 51(5): 47-57.
QI Jinshan, YAO Liangzhong, LIAO Siyang, et al. Online probabilistic assessment of static voltage stability margin for power systems with a high proportion of renewable energy[J]. *Power System Protection and Control*, 2023, 51(5): 47-57.
- [30] 颜湘武, 徐韵. 考虑网络动态重构含多异质可再生分布式电源参与调控的配电网多时空尺度无功优化[J]. *电工技术学报*, 2019, 34(20): 4358-4372.
YAN Xiangwu, XU Yun. Multiple time and space scale reactive power optimization for distribution network with multi-heterogeneous DRG participating in regulation and considering network dynamic reconfiguration[J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2019,

- 34(20): 4358-4372.
- [31] 方一晨, 张沈习, 程浩忠, 等. 含智能软开关的主动配电网分布式光伏准入容量鲁棒优化[J]. 电力系统自动化, 2021, 45(7): 8-17.
FANG Yichen, ZHANG Shenxi, CHENG Haozhong, et al. Robust optimization of distributed photovoltaic hosting capacity of active distribution network with soft open point[J]. Automation of Electric Power Systems, 2021, 45(7): 8-17.
- [32] 张瑞曦, 徐青山, 程煜, 等. 极端灾害下考虑动态重构的微网形成策略[J]. 电力工程技术, 2022, 41(1): 56-63.
ZHANG Ruixi, XU Qingshan, CHENG Yu, et al. Microgrid formation strategy considering dynamic reconstruction under extreme disasters[J]. Electric Power Engineering Technology, 2022, 41(1): 56-63.
- [33] 唐海国, 张帝, 刘成英, 等. 计及拓扑变换的主动配电网故障风险智能预警[J]. 电力工程技术, 2022, 41(5): 193-201.
TANG Haiguo, ZHANG Di, LIU Chengying, et al. Intelligent forecast of fault risk in active distribution networks considering network reconfiguration[J]. Electric Power Engineering Technology, 2022, 41(5): 193-201.
- [34] 赵晶晶, 贾然, 陈凌汉, 等. 基于深度学习和改进K-means聚类算法的电网无功电压快速分区研究[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(14): 89-95.
ZHAO Jingjing, JIA Ran, CHEN Linghan, et al. Research on fast partition of reactive power and voltage based on deep learning and an improved K-means clustering algorithm[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(14): 89-95.
- [35] 李顺祎, 汪颖, 杨敏辉. 基于改进K-means聚类的配电网电压暂降频次估计法[J]. 电力工程技术, 2021, 40(6): 103-112.
LI Shunwei, WANG Ying, YANG Minhui. Estimation method of voltage sag frequency in distribution network based on improved K-means clustering algorithm[J]. Electric Power Engineering Technology, 2021, 40(6): 103-112.
- [36] 乐健, 郎红科, 廖小兵, 等. 基于广义线性多面体的有源配电网仿射可调鲁棒优化方法[J]. 电力系统自动化, 1-18[2023-10-11]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/32.1180.TP.20230925.0742.002.html>.
LE Jian, LANG Hongke, LIAO Xiaobing, et al. Affinely adjustable robust optimization method for active distribution network based on generalized linear polyhedral[J]. Automation of Electric Power Systems, 1-18[2023-10-11]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/32.1180.TP.20230925.0742.002.html>.
- [37] 李伟豪, 杨伟, 左逸凡, 等. V2G模式下基于SaDE-BBO算法的有源配电网优化[J]. 电力工程技术, 2023, 42(4): 41-49.
LI Weihao, YANG Wei, ZUO Yifan, et al. Optimization of active distribution network based on SaDE-BBO algorithm in V2G mode[J]. Electric Power Engineering Technology, 2023, 42(4): 41-49.
- [38] 王莹, 肖峻, 曹严. 柔性配电网间歇性分布式发电消纳能力分析[J]. 电力系统自动化, 2022, 46(13): 74-83.
YING Wang, JUN Xiao, YAN Cao. Analysis on accommodation capability of intermittent distributed generation in flexible distribution network[J]. Automation of Electric Power Systems, 2022, 46(13): 74-83.
- [39] 程钊, 陈羽, 孙伶俐. 考虑服务配置的细粒度电力任务云边协同优化调度策略[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(7): 53-62.
CHENG Qian, CHEN Yu, SUN Lingyan. Cloud-edge collaborative optimization scheduling strategy for fine-grained power tasks considering service configuration[J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(7): 53-62.
- [40] 姜小涛, 方磊, 牛睿, 等. 基于变异反向学习郊狼优化算法的光伏智能边缘终端优化配置方法[J]. 电力建设, 2021, 42(3): 45-53.
JIANG Xiaotao, FANG Lei, NIU Rui, et al. Application of coyote optimization algorithm based on mutation and opposition-based learning in optimal configuration of photovoltaic intelligent edge terminal[J]. Electric Power Construction, 2021, 42(3): 45-53.

收稿日期: 2023-04-13; 修回日期: 2023-06-14

作者简介:

朱丹丹(1991—), 女, 博士, 高级工程师, 主要研究方向为电力系统经济调度、无功配置及电压控制等; E-mail: zdd_life@126.com

周前(1978—), 男, 硕士, 研究员级高级工程师, 主要研究方向为电力系统自动控制; E-mail: xjtu@js.sgcc.com.cn

贾勇勇(1986—), 男, 硕士, 高级工程师, 主要研究方向为电力系统故障恢复; E-mail: jiayy@js.sgcc.com.cn

刘方(1989—), 男, 通信作者, 博士, 主要研究方向为电力系统经济调度、人工智能技术在电力系统运行分析中的应用等。E-mail: liufang_SUEP@163.com

(编辑 姜新丽)