

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.250652

弱支撑直流外送系统下计及有功电压耦合的多类型资源 有功调节空间量化及实时控制方法

李国庆¹, 孙赫阳¹, 韩杰祥², 牛甄³, 江守其¹, 辛业春¹

(1. 现代电力系统仿真控制与绿色电能新技术教育部重点实验室(东北电力大学), 吉林 吉林 132012; 2. 国网甘肃省电力公司, 甘肃 兰州 730030; 3. 国网甘肃省电力公司电力科学研究院, 甘肃 兰州 730000)

摘要: 弱支撑新能源基地直流外送系统低惯量、弱阻尼、低短路比等特征凸显, 有功与电压存在强耦合关系, 导致现有有功实时控制模式难以适用。为此, 提出了一种兼顾静态电压安全约束与多类型资源有效调节空间的有功实时控制方法, 在维持系统安全稳定运行的同时合理利用调节资源。首先, 分析了系统有功电压耦合的诱因并建立灵敏度指标, 量化了不同运行工况下有功电压耦合程度。接着, 考虑新能源出力不确定性对系统电压的影响, 结合阻抗模裕度指标, 提出了基于概率潮流计算的电压薄弱点识别方法, 通过分析多类型资源有功出力对薄弱点电压的影响, 提出了计及静态电压安全约束的多类型资源有功调节空间量化方法。然后, 结合电压有功灵敏度和多类型资源有效调节空间, 设计了考虑调控资源选取及功率差异化分配的有功实时控制策略, 在满足有功调控需求的同时降低对薄弱点电压的影响。最后, 基于改进的 IEEE30 节点算例, 验证了所提方法的有效性。

关键词: 弱支撑直流外送系统; 自动发电控制; 有功调节空间; 有功实时控制

Quantification of active power regulation space and real-time control for multi-type resources considering active power-voltage coupling in weakly supported DC transmission systems

LI Guoqing¹, SUN Heyang¹, HAN Jiexiang², NIU Zhen³, JIANG Shouqi¹, XIN Yechun¹

(1. Key Laboratory of Modern Power System Simulation and Control & Renewable Energy Technology, Ministry of Education (Northeast Electric Power University), Jilin 132012, China; 2. State Grid Gansu Electric Power Company, Lanzhou 730030, China; 3. Electric Power Research Institute, State Grid Gansu Electric Power Company, Lanzhou 730000, China)

Abstract: In DC transmission systems exporting power from weakly supported renewable energy bases, characteristics such as low inertia, weak damping, and low short-circuit ratio become prominent. Strong coupling between active power and voltage exists, making conventional real-time active power control modes difficult to apply. To address this issue, this paper proposes a real-time active power control method that simultaneously considers static voltage security constraints and the effective regulation space of multi-type resources, ensuring system stability while optimizing resource utilization. First, the coupling mechanism is analyzed, and a sensitivity index is established to quantify coupling degrees under different operating conditions. Then, considering renewable energy uncertainty, a voltage weak point identification method based on probabilistic power flow is proposed by integrating impedance modulus margin. By analyzing the effects of active power outputs of different types of resources on weak-point voltages, a method for quantifying the active power regulation space of multi-type resources under static voltage security constraints is developed. Then, integrating active power-voltage sensitivity and the effective regulation space of multi-type resources, a real-time active power control strategy is designed that accounts for regulation resource selection and differentiated power allocation, thereby meeting active power regulation requirements while reducing adverse impacts on weak-point voltages. Finally, the effectiveness of the proposed method is validated through case studies based on a modified IEEE 30-bus system.

This work is supported by the Science and Technology of the Headquarters of State Grid Corporation of China (No. 5100-202340815A-3-8-KJ).

Key words: weakly supported HVDC transmission systems; automatic generation control; active power adjustment space; real-time active power control

基金项目: 国家电网公司总部科技项目资助(5100-202340815A-3-8-KJ)

0 引言

随着全球能源转型加速推进,“沙戈荒”地区凭借其广袤的土地资源与丰富的风光资源,已成为我国新能源规模化开发的战略要地^[1]。由于新能源基地大多地处偏远地区,常规电源匮乏,且与交流主网的电气连接极为薄弱,有功和电压耦合问题日益突出^[2],传统基于功率解耦的有功控制决策已不能满足其调度运行的要求,亟需开展计及有功和电压耦合影响的有功实时控制方法研究,以保证弱支撑直流外送系统的安全稳定运行。

在有功电压耦合及薄弱点识别方面,现有文献针对稳态下有功电压耦合机理分析较少,文献[3]指出在电网线路呈高阻比以及大功角工况下,有功功率与电压之间的耦合效应显著。文献[4]分析了分布式能源的功率与并网节点电压之间的关系,其功率电压耦合特性与分布式能源的渗透水平和运行功率因数有关,且对电网无功调节、电压稳定等方面存在多维度影响。针对薄弱点识别问题,现有文献主要通过基于奇异值分解法的 LC 指标、模态分析法^[5]、阻抗模裕度指标反映电网节点电压的薄弱程度。文献[6]对引入负荷预测模型的微电网潮流雅克比矩阵进行奇异值分解,获取节点电压强弱情况。文献[7]在传统的 Q-V 模态分析法基础上,考虑了节点有功微增量变化对模态分析结果的影响,为薄弱点判断提供了更全面的依据。文献[8]提出广义阻抗模裕度指标,通过裕度排序确定系统薄弱节点。

自动发电控制(automatic generation control, AGC)作为电力系统中维持有功功率供需平衡、确保频率稳定的重要手段,现有 AGC 分配策略主要分为按照机组调控能力“优先级”^[9-12]的调用策略和基于预设比例^[13-15]的分配策略。在调频资源有功调节能力评估方面,现有研究主要通过调频资源的功率能量和动态性能等指标衡量其调节能力。文献[16]采用功率可调节量、调节可持续时间和电量可调节量来评估工业负荷二次调频能力;文献[17]则通过计算不同置信水平下的基准负荷、上调量、下调量等得到节点级柔性资源可调节能力指标;文献[18]考虑需求侧资源功率调节的时序相关性,以相邻时段可调节功率区间来量化其功率调节能力。在新能源参与有功实时控制方面,《西北区域电力并网运行管理实施细则》《西北区域电力辅助服务管理实施细则》补充规则对西北区域内新能源 AGC 管理进行了详细规定,总装机容量在 10 MW 及以上的新能源场站及其站内储能必须配置自动发电控制系统^[19]。文献[20]对比了不同风电场层 AGC 分配策

略,并指出其响应时间随机组台数的增加而增加。针对多个光伏逆变器间的协调,根据可用出力按比例分配调节指令是一种简单有效的手段^[21]。

综上,现有有功实时控制方法均未考虑机组有功出力调整对系统电压的影响,未计及电压安全约束的有功调节空间往往会高估资源的实际调控能力,在调节过程中易造成薄弱点电压越限。因此,厘清有功电压耦合对多类型资源有效调节空间的影响,开展电压安全约束下的有功实时控制研究对弱支撑直流外送系统安全稳定运行具有重要意义。

在此背景下,本文针对弱支撑直流外送系统,提出了一种兼顾静态电压安全约束与多类型资源有效调节空间的有功实时控制方法。建立了能够反映有功电压耦合关系的灵敏度指标,并基于概率潮流计算得到阻抗模裕度指标,以此识别不同时段内的电压薄弱点,通过分析多类型资源有功出力对薄弱点电压的影响,量化评估了多类型资源有功调节空间。为降低电网有功调控对薄弱点电压的影响,提出基于电压灵敏度的 AGC 机组优选及考虑有效调节空间的功率分配策略。最后改进的 IEEE30 节点系统仿真结果表明,所提策略与传统策略相比,在提升有功调控效能的同时保障了系统电压安全。

1 弱支撑直流外送系统有功电压耦合特性影响分析

1.1 弱支撑直流外送系统结构

弱支撑直流外送系统结构如图 1 所示。新能源基地以风电、光伏发电为主体,搭配火电作为支撑电源,新能源与火电在同一送端与交流主网弱连接,汇集后经特高压直流实现跨区域电力输送。该系统运行过程中,依靠先进的调度控制技术,协调新能源、火电各类型电源的出力,保障电力稳定供应和系统安全运行,同时提升新能源消纳水平。

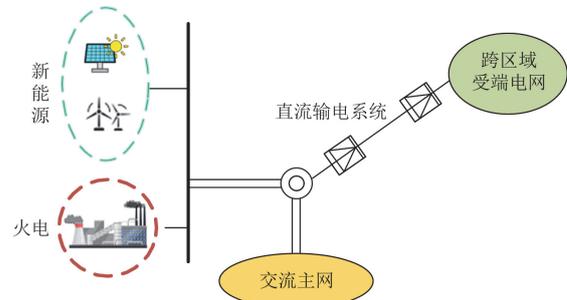


图 1 弱支撑直流外送系统结构

Fig. 1 Structure of weak-support DC transmission system

由于弱支撑直流外送系统与交流主网远距离弱连接,且配套常规电源与电网提供的支撑能力有限,

送端系统结构形态与动态特性将呈现前所未有的复杂性, 给系统的安全稳定运行带来严峻挑战。因此, 在常规支撑电源匮乏的场景下, 有必要进一步挖掘新能源机组的调控潜力, 使其能够参与系统 AGC 控制, 通过主动响应 AGC 有功功率指令, 动态调整其发电功率, 主动支撑系统频率安全, 可有效平抑新能源出力的随机性与强波动性, 降低气象灾害对系统安全运行的潜在冲击。

1.2 有功电压耦合对系统的影响及其量化

在弱支撑直流外送系统中, 新能源出力以及直流外送功率与电压之间存在强耦合关系, 给送端系统的安全稳定运行带来诸多影响。一方面, 由于新能源基地远离主网且本地支撑能力不足, 加之其出力具有强随机性, 功率频繁波动通过线路阻抗直接影响电压波动, 增加局部电压越限风险。同时, 电网等效阻抗中阻性分量的存在导致无功功率与有功、有功功率与电压间存在固有耦合关系。相量分析如图 2 所示, 当输送的有功功率增加时, 电流 \dot{i}_0 有功分量相应增加 ΔI_p , 该电流变化将在电网阻抗上产生压降, 导致节点电压的相角偏移和幅值变化(从 \dot{U}_0 变为 \dot{U}_1 或 \dot{U}_1'), 新的电流矢量在新电压垂直方向上的投影不再为 0, 从而产生了附加的无功电流分量(ΔI_Q 或 $\Delta I_Q'$), 引起无功功率变化。类似地, 当无功功率变化使得电流无功分量增加 ΔI_Q , 同样由于电网阻抗的压降产生附加的有功电流分量(ΔI_p 或 $\Delta I_p'$), 且随着阻性分量占比增加, 放大了有功功率变化对节点电压角度与幅值的扰动, 使得有功功率变化所引起的电压变化更为显著。另一方面, 在电网换相整流器高压直流输电系统中, 为维持直流系统的功率平衡和稳定运行, 往往通过调节触发角等控制量来改变直流传输功率, 而触发角的调整还会引起换流器无功消耗的变化, 进而影响其交流侧电压。

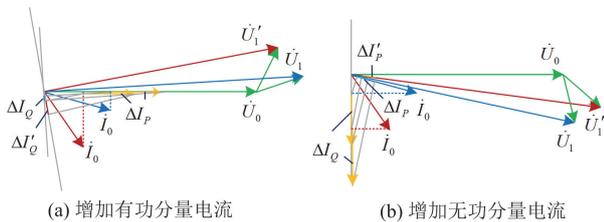


图 2 弱支撑系统功率耦合机理

Fig. 2 Power coupling mechanism in weak grids

因此, 为厘清有功和电压的强耦合关系及其对系统安全稳定运行的影响, 采用电压有功灵敏度量化新能源接入点有功出力及直流外送功率对节点电压的影响程度, 该灵敏度可通过潮流方程推导得到。

弱支撑直流外送系统的稳态潮流方程^[22]为

$$\begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix} = \mathbf{J}' \begin{bmatrix} \Delta \theta \\ \Delta U \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{J}_{P\theta} & \mathbf{J}'_{PU} \\ \mathbf{J}_{Q\theta} & \mathbf{J}'_{QU} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \theta \\ \Delta U \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中: ΔP 和 ΔQ 分别为交流母线有功和无功功率的修正向量; $\Delta \theta$ 和 ΔU 分别为交流母线电压相角和幅值的修正向量; $\mathbf{J}_{P\theta}$ 、 \mathbf{J}'_{PU} 、 $\mathbf{J}_{Q\theta}$ 和 \mathbf{J}'_{QU} 为雅克比矩阵 \mathbf{J} 的子矩阵。换流站的功率只受换流母线电压幅值的影响, 因此 $\mathbf{J}_{P\theta}$ 和 $\mathbf{J}_{Q\theta}$ 保持不变, \mathbf{J}'_{PU} 和 \mathbf{J}'_{QU} 修正为 \mathbf{J}'_{PU} 和 \mathbf{J}'_{QU} 。若有整流站换流母线 r , 则 \mathbf{J}'_{PU} 和 \mathbf{J}'_{QU} 中相应的对角元素 $(\mathbf{J}'_{PU})_{rr}$ 和 $(\mathbf{J}'_{QU})_{rr}$ 修改为^[23]

$$\begin{cases} (\mathbf{J}'_{PU})_{rr} = (\mathbf{J}_{PU})_{rr} - \frac{\partial P_{dr}}{\partial U_r} \\ (\mathbf{J}'_{QU})_{rr} = (\mathbf{J}_{QU})_{rr} - \frac{\partial Q_{dr}}{\partial U_r} \end{cases} \quad (2)$$

式中: P_{dr} 和 Q_{dr} 分别为换流站交流母线注入整流器的有功功率和无功功率; U_r 为母线 r 的电压幅值。 $\partial P_{dr}/\partial U_r$ 和 $\partial Q_{dr}/\partial U_r$ 这两个修正量均随整流站控制方式不同而变化。修正后的雅克比矩阵 \mathbf{J}' 求逆即可得到电压有功灵敏度矩阵 \mathbf{S} 。

$$\mathbf{S} = \mathbf{J}'^{-1} = \begin{bmatrix} \mathbf{S}_{\theta P} & \mathbf{S}_{\theta Q} \\ \mathbf{S}_{UP} & \mathbf{S}_{UQ} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{\partial \theta}{\partial P} & \frac{\partial \theta}{\partial Q} \\ \frac{\partial U}{\partial P} & \frac{\partial U}{\partial Q} \end{bmatrix} \quad (3)$$

式中: $\mathbf{S}_{\theta P}$ 、 $\mathbf{S}_{\theta Q}$ 、 \mathbf{S}_{UP} 、 \mathbf{S}_{UQ} 分别为相角有功、相角无功、电压有功、电压无功灵敏度矩阵。

由式(3)可以求解出节点 k 电压对注入节点 j 功率变化的灵敏度 $\partial U_k/\partial P_j$, 从上述公式推导可知, 在换流母线节点, 因整流侧控制方式不同, 雅克比矩阵存在差异, 直接导致直流有功功率对换流母线电压的灵敏度产生变化, 如图 3 所示, 图 3(a)、图 3(b)为定电流控制方式下, 增加电流指令换流母线灵敏度绝对值的变化。如图 3(b)所示, 直流电流的增大直接提高了直流输送功率, 整流站消耗的无功功率也相应增加, 使得交流系统电压水平下降, 导致电压对有功扰动的敏感性显著增强。图 3(c)、图 3(d)为定触发角控制方式下, 增大触发角时灵敏度绝对值的变化。如图 3(d)所示, 曲线初始上升段主要因为触发角增大引起整流站无功消耗剧增和母线电压下降; 随着触发角进一步增大, 有功功率传输能力下降, 其与换流母线电压之间的耦合强度减弱, 因而曲线后续下降。由于新能源出力具有强波动性, 不同新能源渗透率对系统节点电压有功灵敏度影响不同, 其影响见附录 A 图 A1—图 A4。具体而言, 电压有功灵敏度越高, 意味着有功功率的微小变化

会引起电压的显著波动,反之,电压有功灵敏度越小则意味着电压对有功调整的敏感性较弱。鉴于此,为保障电力系统安全运行,在选取调节资源时,应充分考虑电压有功灵敏度,为后续制定新能源参与有功调控策略提供理论依据。

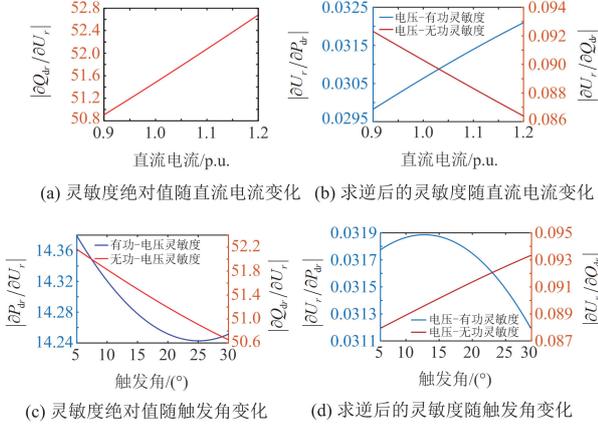


图3 直流送端不同控制方式对换流母线灵敏度绝对值影响
Fig. 3 Influence of different DC sending-end control modes on the absolute value of converter bus sensitivity

2 有效调节空间评估

明确不同运行工况下风光火多类型资源的有功调节空间是实现有功实时控制的前提。鉴于新能源的间歇性与波动性易引发电网潮流剧烈变化,且弱支撑直流外送系统中存在显著的有功电压强耦合效应,若未计及电压安全约束,对新能源机组可调空间的预测将高估其实际调控能力。因此,本节通过分析风光出力对薄弱点电压的作用,提出一种计及静态电压安全约束的有功调节空间量化方法,为实现风光火多类型资源参与有功实时控制奠定基础。

2.1 计及新能源不确定性的电压薄弱点识别

考虑新能源出力的不确定性,本节基于概率潮流与阻抗模裕度识别次日潜在电压薄弱区域。首先根据历史数据,基于自适应扩散核密度预测各时段新能源出力的概率分布模型^[24],然后采用模拟法随机生成若干组数据,重复进行确定性潮流计算,最后基于每次潮流计算所得的电压与功率数据,计算相应的阻抗模裕度,为接下来统计阻抗模裕度概率分布特征并识别电压薄弱点集合奠定数据基础。

相比其他静态电压分析方法,阻抗模裕度指标计算简便、结构简单,能够实时量化电压稳定裕度,物理概念直观,无需计算戴维宁等值电势,在复杂系统中准确性更高、评估更全面^[22],尤其在高阻比线路等有功电压强耦合场景中具有显著优势,其效果可见附录A表A1。

本节基于文献[25]将新能源场站与直流送端换流站等值为阻抗,构建弱支撑直流外送系统阻抗模裕度指标 μ 。

$$\mu = 1 - \frac{|Z'_s|}{|Z'_L|} = 1 - \frac{|Z'_s| \sqrt{P_t^2 + Q_t^2}}{U_t^2} \quad (4)$$

式中: Z'_L 为 t 时刻新能源场站或负荷的等值阻抗; U_t 、 P_t 、 Q_t 分别表示 t 时刻获取的新能源场站或负荷节点电压幅值、有功功率和无功功率; Z'_s 为新能源或负荷节点的系统阻抗。当 μ 接近1时系统稳定; μ 趋近于0表示系统临近静态电压稳定极限。因此可通过比较节点的阻抗模裕度大小来识别系统电压薄弱点,阻抗模裕度相近的薄弱点将构成电压薄弱点集合。尽管新能源出力预测存在一定误差,导致阻抗模裕度的数值发生波动,但鉴于系统网架结构保持不变,节点的系统阻抗也相应稳定,因此电压薄弱点集合中的节点基本维持不变。

附录A图A5为弱支撑直流外送系统某日预测的电压薄弱点阻抗模裕度概率密度函数,色彩越暖且曲面越高的区域,意味着在该时段阻抗模裕度相应取值出现的概率越大。这一结果的生成依赖于自适应扩散核模型对输入变量联合分布的精准刻画,该模型显著降低了蒙特卡洛抽样规模。在每次重复潮流计算时,同步获取新能源及负荷节点的阻抗模裕度,基于核密度估计生成其概率密度函数,最终,通过提取特定概率特征(如平均值)下的阻抗模裕度,量化节点电压薄弱程度的时空分布特性,从而识别各时段电压薄弱点集合。

2.2 计及静态电压安全约束的多类型资源有功调节空间量化评估

PV曲线作为静态电压安全评估的常用工具,其横坐标表示新能源接入点有功出力,纵坐标表示薄弱节点电压,曲线拐点表征系统静态电压稳定极限。基于连续潮流算法绘制PV曲线,如图4所示,从当前运行点出发,保持功率因数恒定,按预设步长递增新能源机组出力,同步追踪薄弱点集合中的电压变化轨迹。通过提取薄弱点集合中各节点在电压安全范围内(0.95~1.05 p.u.)对应机组的出力变化范围,将其中最小的出力变化范围确定为电压安全约束下的有功调节空间,以此量化各时段内多类型资源有功调节的安全边界。

在新能源参与有功实时控制场景下,风电和光伏需按既定减载比例预留有功备用,以确保具备向上调节能力并参与AGC。考虑到依赖人工经验确定的调频容量保守度较高,难以应对新能源的随机波动,且忽略了有功调节对系统电压的影响,本文提出一种计及电压安全约束的机组有功调节空间量化

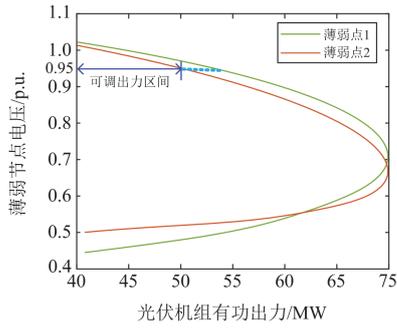


图 4 薄弱点集合中节点电压随新能源有功出力变化曲线

Fig. 4 Curves of weak set node voltage vs. renewable active output

分析方法。针对日前预测的系统电压薄弱点生成新能源机组多维度 PV 曲线簇，获取机组各时段电压允许范围内的有效可调区间，最终整合形成计及静态电压安全约束的有效调节空间。

1) 风电机组有功调节空间

风电机组参与有功实时控制时，通常需按风电出力的 10%~20% 减载比运行，以预留系统运行备用。在风电大发时段，风电场输出有功功率增加，所需无功功率也随之增大，导致电网节点电压下降，因此往往在强风时提高减载比以预留更多的可调容量，在此设置为风电功率的 20%，以应对可能出现的各种扰动情况。如图 5 所示，在找到系统各时段电压薄弱点后，根据不同时段备用预留情况的差异，图 5(a) 展示了每小时风电机组有功出力从减载到恢

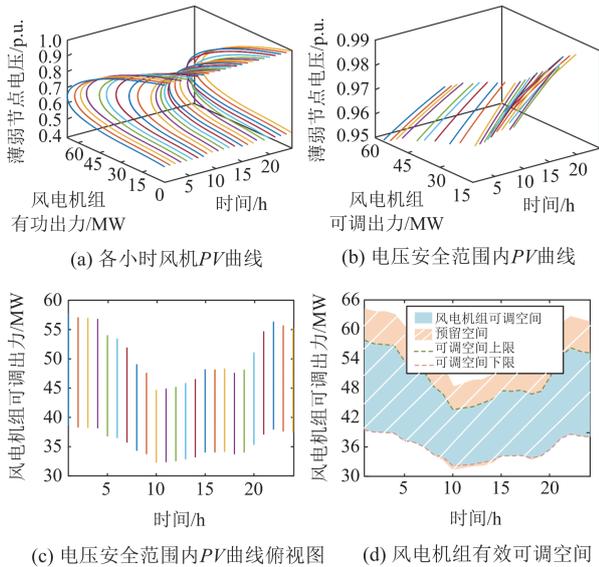


图 5 沙戈荒秋季某日前 24 h 风电机组 PV 曲线及其有效可调空间

Fig. 5 24-hour PV curves & effective adjustable spaces of wind turbines at a sandy, gobi and desert base in autumn

复过程中薄弱点电压的变化趋势，从中筛选出电压安全范围内的曲线部分如图 5(b) 所示，其对应的功率变化量即为风电机组可调出力，图 5(c) 从平面视角给出了有功出力区间，最终由这些区间构成风电 24 h 的有效可调空间，由图 5(d) 可以看出，相较于黄色未考虑电压安全预留的调节空间，蓝色的有效可调空间显著缩减。该方法通过截取 PV 曲线将电压安全约束转化为有效可调边界，有效克服了弱支撑直流外送系统因有功电压强耦合导致的资源有功可调范围不准确的问题。

2) 光伏机组有功调节空间

正常运行状态下，光伏输出功率主要受光照强度的影响。光照条件不同时，光伏参与有功实时控制的调节容量需根据具体时段动态调整，其减载率一般不超过 20%。基于风电有功调节空间评估方法构建了光伏有效可调空间量化模型，如图 6 所示。在沙戈荒清晨和夜间弱光照时段，因光照强度不足，光伏输出功率受限，该时段通常不进行主动减载预留备用，而采用最大功率跟踪模式运行，以最大化光能转换效率；在中午强光照时段，相比弱光照时段可调容量更多，有较大的调节潜力，但考虑到有功功率调节对薄弱点电压的影响，其调节潜力无法完全发挥，导致其有功调节空间在一定程度上受到限制有所缩小。该量化方法通过动态调整光伏调节容量，有效避免了因过度调节引发的电压越限问题，合理界定了光伏有功调节的有效空间，实现了光伏资源调节能力与电网安全的平衡。

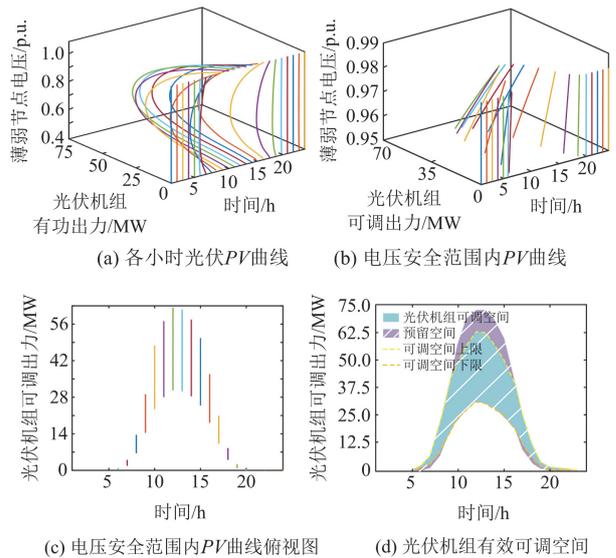


图 6 沙戈荒秋季某日前 24 h 光伏机组 PV 曲线及其有效可调空间

Fig. 6 24-hour PV curves & effective adjustable spaces of photovoltaic units at a sandy, gobi and desert base in autumn

3 计及有效调节空间的多类型资源有功实时控制

AGC 可以自动地、无差地根据系统需求调节有功功率, 其以区域控制偏差为导向, 通过调节发电机组出力, 使区域控制偏差(area control error, ACE)不断趋近于 0, 从而实现电力系统频率稳定和联络线功率按计划运行的控制目标。但是随着新能源的大量接入, 当新能源超短期预测出力与日前计划出现偏差时, 需要通过重构 ACE 计算模型, 将新能源功率预测偏差纳入 AGC 控制环节, 其数学表征为

$$\lambda_{ACE} = K\Delta f + \Delta P_T + \Delta P_W \quad (5)$$

式中: λ_{ACE} 为模型输出的 ACE 信号; Δf 为系统的频率偏差; K 为频率偏差系数; ΔP_T 为联络线上的功率偏差; ΔP_W 为新能源超短期功率与日前预测功率的偏差。

区域控制偏差信号通过控制器处理后, 生成控制区域的 AGC 指令, 再通过机组分配因子分配给各 AGC 机组, 逐步减小 ACE 并恢复到 0。新能源参与 AGC 模型框图如图 7 所示。

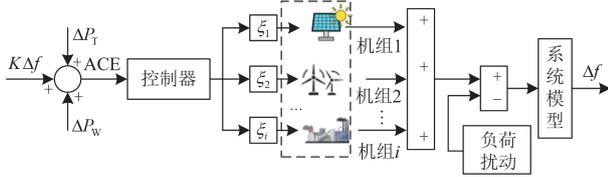


图 7 新能源参与 AGC 控制模型

Fig. 7 AGC control model for new energy participation

为最大化抑制有功调节引发的电压波动, 本文提出了基于电压有功灵敏度的 AGC 机组动态优选方法和计及有效调节空间的功率精细化分配策略。在 AGC 机组动态优选方面, 根据输入的 ACE 信号计算生成总功率调整量后, 优先选择电压有功灵敏度较低的 AGC 机组参与有功实时控制, 按照这一原则依次选取机组, 直至所选机组可调容量总和达到总功率调整量要求, 从而确定参调的 AGC 机组。在功率精细化分配环节, 针对新能源出力日前小时级与超短期分钟级预测可能存在误差的问题, 设计基于动态修正的有效调节空间总功率分配策略。由于 PV 曲线在电压安全约束范围内具有较好的平滑性, 有效可调容量与预测有功出力之间可近似为线性关系。在实时控制环节, 基于此线性关联, 以超短期预测出力为基准, 通过日前预先设定的比例系数快速计算各新能源机组的有效可调容量, 例如日前预测出力为 100 MW, 有效可调容量为 10 MW, 则比例系数为 10%; 若超短期预测出力调整为

90 MW, 则有效可调容量改为 9 MW。该方法无需在线进行复杂的潮流计算, 仅通过“查表-计算”即可实现机组可调容量的在线滚动校正, 满足 AGC 实时性要求。最终基于校正后的可调容量分配 AGC 总功率调节量, 各调频资源的分配因子按式(6)计算, 接收的调节指令由式(7)确定。

$$\xi_i = \frac{C_i}{\sum_{i=1}^n C_i} \quad (6)$$

$$\Delta P_i = \xi_i \Delta P_{total} \quad (7)$$

式中: n 为参与调频机组总数; ΔP_i 为分配给第 i 个 AGC 机组的功率命令; ΔP_{total} 为总功率调整量; ξ_i 为第 i 个 AGC 机组的分配因子; C_i 为第 i 个 AGC 机组的有效可调容量。

考虑调控资源选取及功率差异化分配的有功实时控制策略具体流程如图 8 所示, 主要包含以下 4 个步骤。

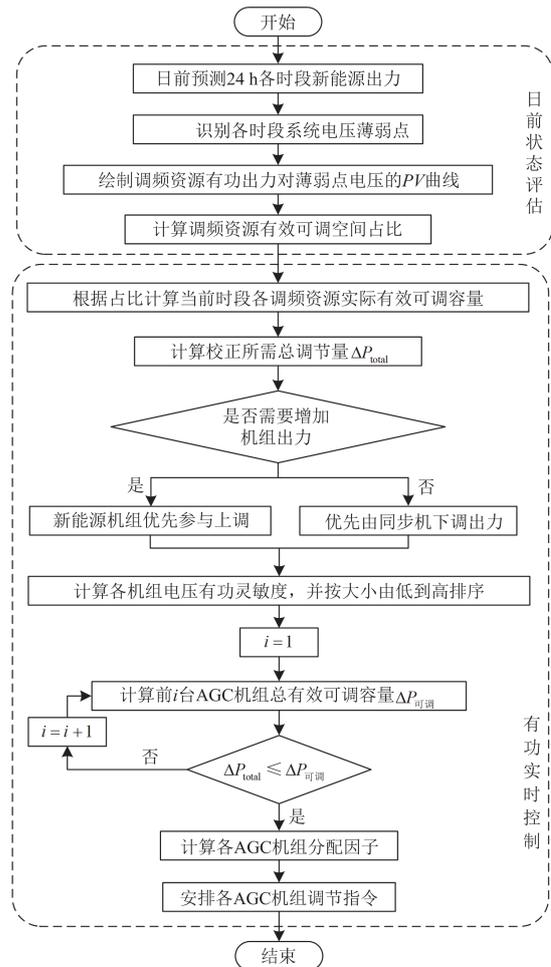


图 8 有功调节空间评估及实时校正控制流程

Fig. 8 Active power regulation margin assessment and real-time correction control process

步骤 1: 对预测的日前每小时新能源出力概率分布模型抽样后进行潮流计算, 根据潮流结果计算阻抗模裕度, 识别出各时段系统的电压薄弱点。

步骤 2: 绘制各调频资源有功出力变化对薄弱点电压影响的 PV 曲线, 在电压安全约束范围内评估日前各调频资源的有效调节空间, 计算出有效调节空间占备用容量的比例。

步骤 3: 根据查询到的占比数据计算在日内频率偏差时段中各调频资源的有效可调容量。同时, AGC 计算消除该偏差所需的总功率调整量。当判定需要上调机组出力时, 为促进新能源消纳, 优先安排新能源机组参与 AGC 调节。如果需要下调机组出力, 则优先安排同步机参与调节。

步骤 4: 计算当前时段各机组对薄弱节点电压的有功灵敏度大小并由低到高排序, 从灵敏度最小即对薄弱点电压影响最小的机组开始筛选, 直到所选的 AGC 机组有效可调容量之和大于校正所需总功率调整量, 按各 AGC 机组有效可调容量分配总功率调整量完成有功实时校正。

通过兼顾静态电压安全约束与多类型资源有效调节空间的有功实时控制策略, 实现了有功功率精准调节与电压安全运行的双重保障, 为弱支撑系统提供了兼顾经济性与安全性的调频决策支持, 有效提升系统运行安全与调控效能。

4 算例分析

为验证本文所提有功实时控制策略的有效性, 对 IEEE30 节点仿真系统进行了修改, 将发电机节点 2、5、8、13 替换为新能源节点, 节点 4 的负荷替换为直流输电系统, 额定容量为 100 MVA。新能源出力与负荷数据见附录 A 中图 A6—图 A10 及表 A2。本文建立的直流外送系统采用 12 脉波换流器, 控制方式为整流侧定电流、逆变侧定直流电压。具体仿真系统结构如图 9 所示。

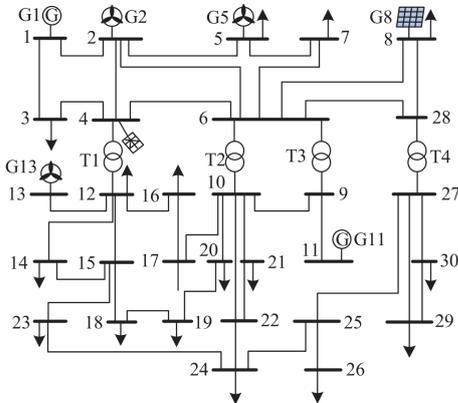


图 9 改进的 IEEE30 节点系统
Fig. 9 Modified IEEE 30-bus system

4.1 有功调节空间评估方法验证

首先, 根据历史数据预测出未来一天每小时新能源出力确定日前发电计划, 通过概率潮流计算得到系统潮流分布, 根据阻抗模裕度指标识别日前每小时系统电压薄弱点。以 12:00 为例, 阻抗模裕度计算结果如图 10 所示。该图保留了阻抗模裕度处于低值区间的 4 个负荷节点的概率密度曲线。

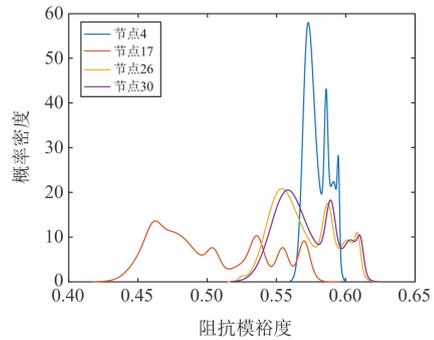
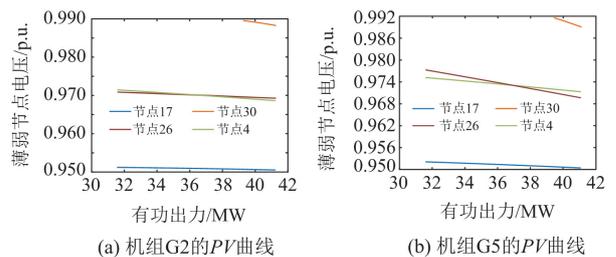


图 10 12:00 部分节点阻抗模裕度概率密度曲线
Fig. 10 Probability density curves of the impedance modulus margin for some nodes at 12:00

经计算, 这 4 个节点的阻抗模裕度均值最小且相近, 其概率密度曲线的分布位置较为集中, 因此将这 4 个节点确定为薄弱点集合。接下来, 绘制各新能源机组有功出力对薄弱集合中节点电压影响的 PV 曲线, 各新能源机组的日前有效可调容量如图 11 所示。为使新能源参与 AGC, 各新能源机组预先按最大输出功率的 20% 留取备用容量。新能源机组 G2 日前计划出力为 $39.625 \times 80\% = 31.7$ MW, 有效可调区间为 $[31.7, 39.625]$ MW, 即为全部备用容量; 新能源机组 G8 计划出力为 $51.25 \times 80\% = 41$ MW, 图 11(c) 保留了薄弱点集合中最小的可调出力范围, 得到机组 G8 有效的可调出力区间为 $[41, 48.4]$ MW。以此类推, 日前 12:00 各机组的有功调节区间如表 1 所示。

当超短期预测出力与日前计划出现偏差时, 按照超短期新能源功率预测结果和电网实际运行情况对新能源机组出力进行调整。由于 PV 曲线在临界电压点附近接近线性, 因此, 可以按照机组有效可调容量占备用容量的比例评估超短期预测出力下的



(a) 机组 G2 的 PV 曲线 (b) 机组 G5 的 PV 曲线

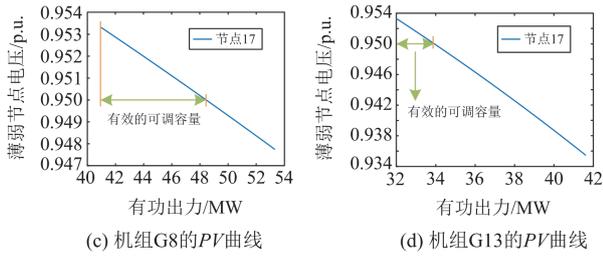


图 11 各可调机组 12:00 有效可调容量

Fig. 11 Effective adjustable capacity of each adjustable generating unit at 12:00

表 1 12:00 各机组日前预测有功出力调节区间

Table 1 The predicted active power regulation interval of each unit in the day-ahead forecast at 12:00

AGC 机组	不考虑电压安全有功调节区间/MW	考虑电压安全有功调节区间/MW
G2	[31.7, 39.625]	[31.7, 39.625]
G5	[31.6, 39.5]	[31.6, 39.5]
G8	[41, 51.25]	[41, 48.4]
G11	[50, 60]	[50, 60]
G13	[32, 40]	[32, 33.9]

有效可调出力区间。例如，机组 G2 日前发电计划为 31.7 MW，而超短期预测出力为 30 MW，因此该机组有效可调出力区间变为[30, 37.5] MW。同理，得到各新能源机组超短期预测出力下的有效可调容量如表 2 所示。

表 2 12:00 各机组超短期预测有功出力调节区间

Table 2 Ultra short term forecast active power regulation interval of each unit at 12:00

AGC 机组	不考虑电压安全有功调节区间/MW	考虑电压安全有功调节区间/MW
G2	[30, 37.5]	[30, 37.5]
G5	[31, 38.75]	[31, 38.75]
G8	[42, 52.5]	[42, 49.58]
G11	[50, 60]	[50, 60]
G13	[32, 40]	[32, 33.9]

4.2 有功实时控制策略验证

由于负荷扰动，电网频率下降 0.42 Hz，经 ACE 计算得到需上调的总功率调整量为 20 MW。此时计算超短期预测出力下各新能源节点对薄弱节点 17 的电压有功灵敏度，筛选参与 AGC 的机组。如表 3 所示，其节点 2、5、8 的灵敏度最小，且有效可调容量之和大于所需的总功率调整量，因此选择此 3 台机组参与 AGC。最后，根据式(6)求得各 AGC 机组的分配因子，按分配因子比例分配给机组 G2、G5、G8 的调整量依次为 6.57 MW、6.79 MW、6.64 MW。其他时段也可按此策略分配。

表 3 新能源节点 12:00 电压灵敏度及有效可调容量

Table 3 Active power sensitivity of new energy node voltage and effective adjustable capacity at 12:00

节点	2	5	8	13
电压有功灵敏度 $\partial V_{17}/\partial P_j$	-0.019 79	-0.020 38	-0.028 27	-0.053 90
有效可调容量/MW	7.5	7.75	7.58	1.8

当不考虑电压影响时，按备用容量比例分配得到机组 G2、G5、G8、G11、G13 的调整量分别为 3.43 MW、3.54 MW、4.8 MW、4.57 MW、3.66 MW，仿真结果如图 12 所示，调整机组出力后引起了节点 17 电压越限，各节点电压结果如表 4 所示。当发电站规模更大、装机容量更多时，调节机组有功出力将引起更加显著的电压变化。

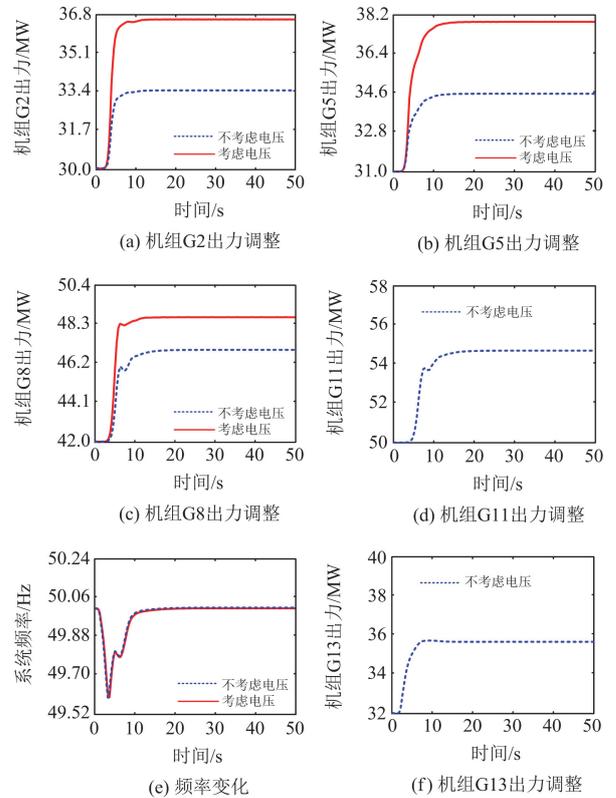


图 12 两种控制策略效果仿真对比

Fig. 12 Comparison of the effects of two control strategies

表 4 两种策略调整后效果对比

Table 4 Comparison of effects after adjustment by two strategies

分配策略	参与机组个数	分配因子比	薄弱点电压越限量/kV	总电压变化量/kV
选机组按有效可调容量分配	3	1:1.03:1.01	0	19.09
所有机组按备用容量分配	5	3.95:4.08:3.99:5.26:1	1.4214	29.91

通过图 13 两种分配策略调整后的电压对比可知, 按所提策略分配功率后系统电压变化更小。仅考虑备用容量虽然可以消除频率偏差, 但引发了多个节点电压幅值的显著波动。而所提分配策略综合考虑了有功对电压的影响, 可避免该问题的发生, 说明了有功实时控制中考虑电压安全约束的必要性。

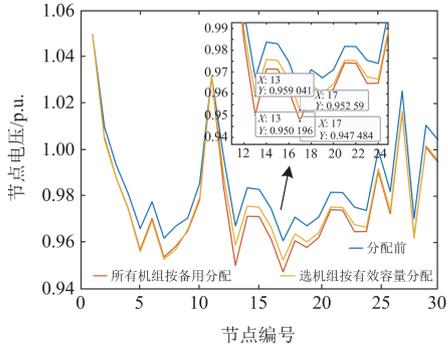


图 13 两种策略调整后各节点电压对比

Fig. 13 Node voltage comparison after two strategy adjustments

附录 A

表 A1 IEEE 标准 30 节点系统不同薄弱点识别方法对比

Table A1 Comparison of different weak node identification methods for the IEEE 30-bus system

场景类型	识别方法					
	阻抗模裕度法		LC 指标法		模态分析法	
常规工况	节点平均薄弱	30>26>29>24>	节点平均薄弱	27>30>24>26>	节点平均薄弱	30>29>26>22>
	程度排序	其他节点	程度排序	其他节点	程度排序	其他节点
	误判率/%	2.9	误判率/%	10.4	误判率/%	9.4
	识别准确率/%	96.2	识别准确率/%	88.5	识别准确率/%	89.7
重载工况	节点平均薄弱	30>26>19>24>	节点平均薄弱	27>15>26>18>	节点平均薄弱	26>27>30>29>
	程度排序	18>其他节点	程度排序	其他节点	程度排序	其他节点
	误判率/%	6.8	误判率/%	26.4	误判率/%	22.8
	识别准确率/%	91.5	识别准确率/%	72.8	识别准确率/%	76.3
高阻比线路 工况	节点平均薄弱	30>26>19>24>	节点平均薄弱	18>27>26>	节点平均薄弱	29>26>24>18>
	程度排序	29>其他节点	程度排序	其他节点	程度排序	其他节点
	误判率/%	6.6	误判率/%	22.8	误判率/%	20.3
	识别准确率/%	92.3	识别准确率/%	76.3	识别准确率/%	78.5

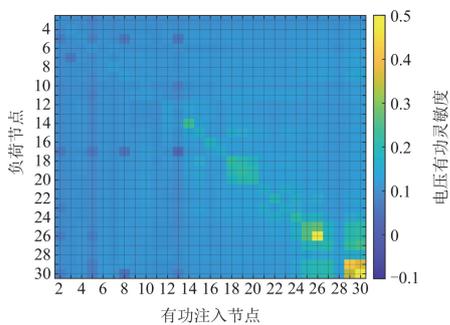


图 A1 新能源渗透率为 30% 时本文算例系统的电压-有功灵敏度矩阵热力图

Fig. A1 Voltage-active power sensitivity matrix for the 30% new energy penetration case

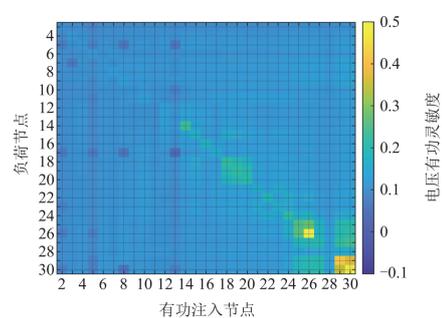


图 A2 新能源渗透率为 45% 时本文算例系统的电压-有功灵敏度矩阵热力图

Fig. A2 Voltage-active power sensitivity matrix for the 45% new energy penetration case

5 结论

为应对弱支撑直流外送系统有功电压耦合影响及现有有功实时控制模式难以完全适用的问题, 本文提出了计及有功电压耦合影响的多类型资源有功调节空间量化分析方法, 设计了考虑静态电压安全约束的有功实时控制策略, 在保障送端系统电压安全稳定的同时实现有功功率的精准控制。主要结论如下。

1) 在有功调节空间量化评估方面, 通过概率潮流计算预测各时段电压薄弱点, 可有效量化新能源机组在静态电压安全约束下的可调容量边界, 解决了弱支撑系统中有功电压强耦合导致的调节范围不准确问题, 为新能源参与 AGC 提供了可靠依据。

2) 在有功实时控制方面, 基于电压有功灵敏度选取 AGC 机组并按有效调节空间分配指令, 实现了更具针对性的有功实时调控, 为弱支撑直流外送系统的安全稳定运行与灵活有功控制提供关键支撑。

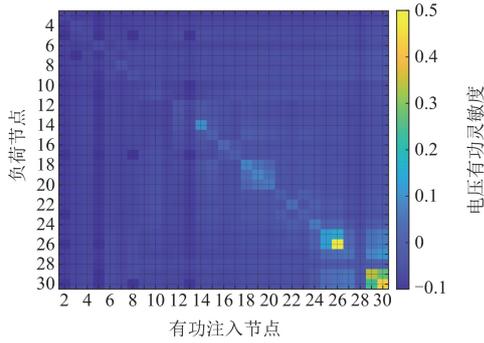


图 A3 新能源渗透率为 60% 时本文算例系统的电压-有功灵敏度矩阵热力图

Fig. A3 Voltage-active power sensitivity matrix for the 60% new energy penetration case

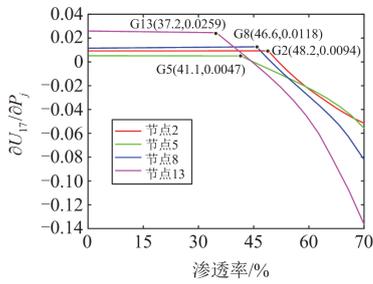


图 A4 薄弱节点电压有功灵敏度随新能源渗透率变化曲线

Fig. A4 Curve of voltage-active power sensitivity of weak nodes with the change of new energy penetration rate

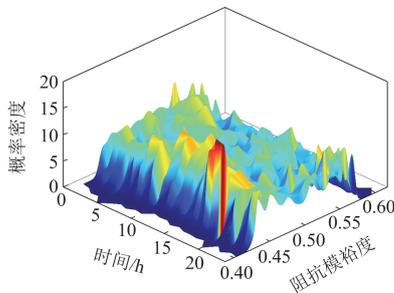


图 A5 日前小时级电压薄弱节点阻抗模裕度概率密度曲线

Fig. A5 Probability density curve of the impedance modulus margin of weak nodes at the hourly level in the recent period

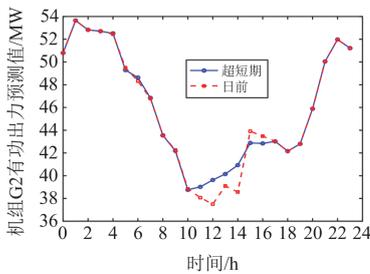


图 A6 机组 G2 有功出力

Fig. A6 Active power output of unit G2

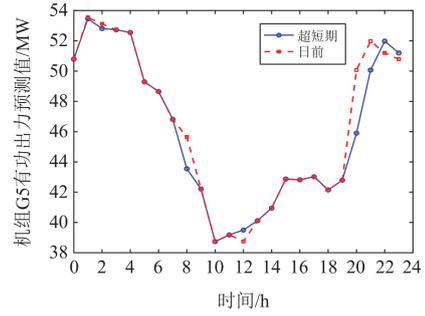


图 A7 机组 G5 有功出力

Fig. A7 Active power output of unit G5

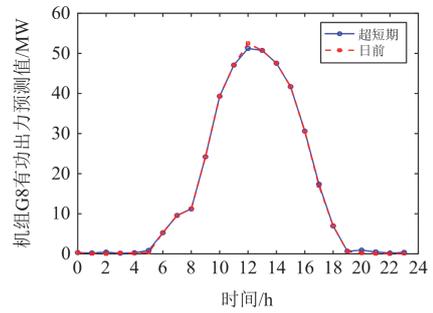


图 A8 机组 G8 有功出力

Fig. A8 Active power output of unit G8

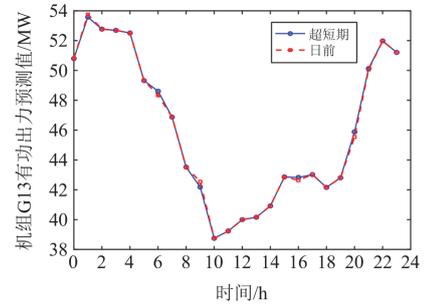


图 A9 机组 G13 有功出力

Fig. A9 Active power output of unit G13

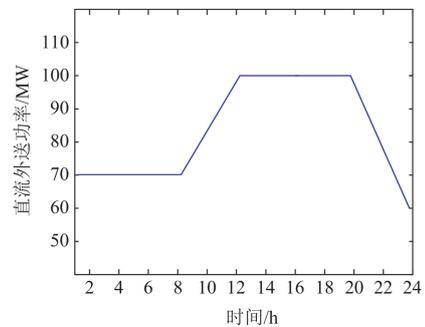


图 A10 直流外送功率曲线

Fig. A10 DC external power transmission curve

表 A2 改进的 IEEE30 节点系统负荷数据

Table A2 Load data of the improved IEEE 30-bus system

节点	负荷/MVA
3	2.67 + j1.33
5	2.88 + j2.22
7	25.33 + j17.67
8	2.67 + j2.22
12	3.56 + j0.56
14	6.89 + j1.78
16	3.89 + j2.00
17	10.00 + j2.00
18	3.56 + j1.00
19	10.56 + j3.78
20	2.44 + j0.78
21	8.33 + j1.33
23	3.56 + j1.78
24	9.67 + j7.44
26	3.89 + j2.56
29	2.67 + j1.00
30	6.22 + j2.11

参考文献

- [1] 国家能源局. 潘慧敏介绍我国第一批“沙戈荒”大型风电光伏基地目前的建设进展[EB/OL]. [2025-01-23]. <https://www.nea.gov.cn/20250123/30c42bd239f64dee8a09363df78adf90/c.html>
National Energy Administration. Pan Huimin introduces the current construction progress of the 1st large-scale wind power and photovoltaic bases in desert, gobi, and wilderness areas in China[EB/OL]. [2025-01-23]. <https://www.nea.gov.cn/20250123/30c42bd239f64dee8a09363df78adf90/c.html>
- [2] 牛春豪, 徐永海. 考虑波动功率耦合的电力电子变压器电容电压纹波抑制方法研究[J]. 电测与仪表, 2025, 62(1): 208-216.
NIU Chunhao, XU Yonghai. Research on capacitor voltage ripple suppression method for power electronic transformer considering fluctuating power coupling[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2025, 62(1): 208-216.
- [3] 闫来清, 邓熙炜, 赵喆, 等. 基于自适应前馈补偿的VSG功率解耦控制策略[J]. 电力系统保护与控制, 2024, 52(24): 64-73.
YAN Laiqing, DENG Xiwei, ZHAO Zhe, et al. VSG power decoupling control strategy based on adaptive feedforward compensation[J]. Power System Protection and Control, 2024, 52(24): 64-73.
- [4] WANG J, YAO L, CUI W, et al. Power-voltage coupling characteristic analysis of power grid integrated with distributed energy resources[C]// 2021 3rd Asia Energy and Electrical Engineering Symposium (AEEES), March 26-29, 2021, Chengdu, China: 563-569.
- [5] 王玲, 吕鸿, 杜婉琳, 等. 基于改进模态分析法的广域配用电系统谐波谐振分析[J]. 供用电, 2025, 42(3): 86-93, 114.
WANG Ling, LÜ Hong, DU Wanlin, et al. Harmonic resonance analysis of wide-area power distribution system based on improved modal analysis method[J]. Distribution & Utilization, 2025, 42(3): 86-93, 114.
- [6] 肖祥香, 段斌, 陈明杰, 等. 一种基于先进逆变器的微电网潮流态势感知方法[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(20): 94-100.
XIAO Xiangxiang, DUAN Bin, CHEN Mingjie, et al. A situation awareness method based on advanced inverter with microgrid power flow algorithm[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(20): 94-100.
- [7] 张忠会, 胡一波, 朱文涛. 模态分析技术在系统薄弱环节分析中的应用[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(15): 58-64.
ZHANG Zhonghui, HU Yibo, ZHU Wentao. Modal analysis technology in the application of the weak parts of systems[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(15): 58-64.
- [8] 颜廷鑫, 刘光晔, 肖白雪, 等. 基于动态等效电路的含DG电力系统电压稳定性分析[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(6): 74-79.
YAN Tingxin, LIU Guangye, XIAO Baixue, et al. Voltage stability analysis of power system with DGs based on dynamic equivalent circuit[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(6): 74-79.
- [9] 雷雨, 向明旭, 黄子蒙, 等. 面向多源协调互济的AGC指令两阶段分配方法[J]. 电力系统保护与控制, 2024, 52(14): 71-81.
LEI Yu, XIANG Mingxu, HUANG Zimeng, et al. A two-stage allocation method for AGC command with multi-resource coordination[J]. Power System Protection and Control, 2024, 52(14): 71-81.
- [10] 徐玉韬, 蔡永翔, 王扬, 等. 考虑跨电压等级电压-功率灵敏度的交直流配电网动态分区方法[J]. 供用电, 2024, 41(7): 29-38.
XU Yutao, CAI Yongxiang, WANG Yang, et al. A dynamic partitioning method for AC-DC distribution networks considering voltage-power sensitivity across voltage levels[J]. Distribution & Utilization, 2024, 41(7): 29-38.
- [11] 徐岩, 甄静, 樊世通. 基于功率灵敏度和经济补偿最小化的线路过负荷紧急控制方法[J]. 电力自动化设备, 2017, 37(1): 118-123.
XU Yan, ZHI Jing, FAN Shitong. Line overload emergency control based on power sensitivity and minimized economic compensation[J]. Electric Power Automation Equipment, 2017, 37(1): 118-123.

- [12] 龚承霄, 李岩松, 刘君, 等. 基于深度学习的大电网断面功率快速自动调整方法[J]. 电力系统自动化, 2023, 47(2): 181-190.
GONG Chengxiao, LI Yansong, LIU Jun, et al. Deep learning based fast automatic adjustment method for cross-section power of bulk power grid[J]. Automation of Electric Power Systems, 2023, 47(2): 181-190.
- [13] MENG L, ZAFAR J, KHADEM S K, et al. Fast frequency response from energy storage systems—a review of grid standards, projects and technical issues[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2020, 11(2): 1566-1581.
- [14] DOENGES K, EGIDO I, SIGRIST L, et al. Improving AGC performance in power systems with regulation response accuracy margins using battery energy storage system (BESS)[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2020, 35(4): 2816-2825.
- [15] 杜刚, 赵冬梅, 刘鑫. 含高比例风电系统随机备用调度研究[J]. 电网技术, 2023, 47(4): 1378-1387.
DU Gang, ZHAO Dongmei, LIU Xin. Stochastic reserve scheduling of high proportion wind power system[J]. Power System Technology, 2023, 47(4): 1378-1387.
- [16] 杨梓轩, 陈磊, 郝玲, 等. 考虑生产环节内特性的工业负荷调峰优化运行及二次调频能力评估[J]. 电网技术, 2025, 49(9): 3613-3622.
YANG Zixuan, CHEN Lei, HAO Ling, et al. Industrial load peak regulation and its secondary frequency regulation capacity assessment considering intra-production segment characteristics[J]. Power System Technology, 2025, 49(9): 3613-3622.
- [17] 张俊成, 黎敏, 刘志文, 等. 配电网用户侧多类型柔性资源调节能力评估方法[J]. 中国电力, 2023, 56(9): 96-103, 119.
ZHANG Juncheng, LI Min, LIU Zhiwen, et al. An evaluation method for multi-type flexible resource regulation capability on the user side of distribution networks[J]. Electric Power, 2023, 56(9): 96-103, 119.
- [18] 李晓露, 徐婉云, 柳劲松, 等. 考虑时序相关性的需求侧资源可调节功率域聚合方法[J]. 电力系统保护与控制, 2024, 52(15): 58-68.
LI Xiaolu, XU Wanyun, LIU Jinsong, et al. Adjustable power domain aggregation method for demand-side resources considering temporal correlation[J]. Power System Protection and Control, 2024, 52(15): 58-68.
- [19] 国家能源局西北监管局. 国家能源局西北监管局关于印发新版“两个细则”补充规则的通知[EB/OL]. [2025-01-02]. https://xbj.nea.gov.cn/dtyw/tzgg/202501/t20250102_274863.html
Northwest Regional Administration of the National Energy Administration. Notice of the Northwest Regulatory Bureau of the National Energy Administration on issuing the supplementary rules of the new version of the “two detailed rules”[EB/OL]. [2025-01-02]. https://xbj.nea.gov.cn/dtyw/tzgg/202501/t20250102_274863.html
- [20] 武晓冬, 朱燕芳, 田慕琴. 风电场层 AGC 常用分配策略的对比研究[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(16): 173-179.
WU Xiaodong, ZHU Yanfang, TIAN Muqin. Comparative study of the popular distribution strategies for the wind farm layer AGC[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(16): 173-179.
- [21] 王淑超, 段胜朋, 王健, 等. 光伏电站面向快速频率响应的优化控制技术研究与实践[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(14): 59-70.
WANG Shuchao, DUAN Shengpeng, WANG Jian, et al. Research and practice of fast frequency response oriented control optimization technology of PV power stations[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(14): 59-70.
- [22] AIK D L H, ANDERSSON G. Voltage stability analysis of multi-infeed HVDC systems[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1997, 12(3): 1309-1318.
- [23] 徐政. 交直流电力系统动态行为分析[M]. 北京: 机械工业出版社, 2004.
- [24] 李国庆, 陆为华, 李赫, 等. 基于模糊 C-均值聚类的时序概率潮流快速计算方法[J]. 电力自动化设备, 2021, 41(4): 116-122.
LI Guoqing, LU Weihua, LI He, et al. Fast calculation method of time sequence probabilistic power flow based on fuzzy C-means clustering[J]. Electric Power Automation Equipment, 2021, 41(4): 116-122.
- [25] 孔贺, 李业成, 张哲, 等. 阻抗模裕度指标在新能源多馈入系统静态电压稳定评估的适应性分析[J]. 中国电机工程学报, 2024, 44(8): 3002-3016.
KONG He, LI Yecheng, ZHANG Zhe, et al. Adaptability analysis of impedance modulus margin index in static voltage stability evaluation of multi-infeed renewable energy power system[J]. Proceedings of the CSEE, 2024, 44(8): 3002-3016.

收稿日期: 2025-06-16; 修回日期: 2025-12-14

作者简介:

李国庆(1963—), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 研究方向为电力系统安全稳定分析与控制、柔性直流输电技术; E-mail: lgq@necpu.edu.cn

江守其(1991—), 男, 通信作者, 博士, 副教授, 研究方向为新能源发电联网技术、柔性直流输电技术。E-mail: jsq@necpu.edu.cn

(编辑 许威)