•新型电力系统•
DOI:10.12454/j.jsuese.202500472

本刊网刊

基于区域划分的配电网电能路由器规划策略

范梓远,余雪莹*,李华强,刘　洋,魏震波,周　毅
(四川大学 电气工程学院,四川 成都 610065)

摘　要:电能路由器(ER)是基于固态变压器的新型智能电力电子设备,具备功率双向调节能力与多端口灵活连接能力,能够实现不同电压等级、不同类型能源的高效互联与调控,在支撑高比例分布式电源(DG)接入、提升配电网调控能力方面具有重要价值。然而,在实际规划中需综合考虑部署位置、连接结构与容量配置等多重耦合要素,导致求解问题维度高、规模大,规划求解面临挑战。为此,提出一种融合区域划分、源荷重心识别与双层优化配置的两阶段ER规划方法。该方法将ER规划划分为位置部署与容量配置两个阶段:第1阶段基于线路电气介数构建复杂网络权重,采用复杂网络理论Louvain算法对配电网进行区域划分,并识别各子区域内的电源与负荷重心,确定ER的部署备选节点与数量;第2阶段建立双层优化模型,上层优化端口数量与连接结构,下层配置端口容量并协调运行方式。同时,引入两阶段可调鲁棒优化,通过考虑最不利扰动场景,在保证安全性的前提下提升配电网经济效益与运行性能。对IEEE–33节点系统的仿真结果表明,所提方法能显著降低配电网传输损耗与节点电压偏差,在降低电压越限风险的同时提高DG消纳水平与配电网整体经济效益,展现出良好的运行性能与实用价值。本文构建的两阶段优化模型可为ER在配电网中的规划部署提供有效支撑。

关键词:电能路由器;配电网;两阶段规划;分布式电源;复杂网络理论;配置策略
中图分类号:TM734　　**文献标志码:**A　　**文章编号:**2096-3246(2026)06-0205-12

随着新能源渗透率大幅提升以及分布式电源(distributed generation,DG)的大规模接入,配电网正逐步由传统单一电源、辐射状结构演化为多源协同供能与局部自治的新型网络形态[1]。受源荷波动性增强与潮流反向等因素影响,当前配电网频繁面临电压越限、网络损耗增加等问题,不仅限制了可再生能源的消纳能力,也对系统的运行安全性与经济性构成挑战[2]。为应对源荷侧动态多变带来的运行不确定性,亟需构建可快速响应、具有可扩展性与结构适应性的控制手段,以支撑未来配电网安全、灵活运行[3]。

当前,传统控制手段难以有效应对配电网结构日趋复杂、运行状态持续演化的变革与DG大规模接入带来的运行挑战。现有控制方式中,储能设备可缓解源荷波动,但其容量受限、成本高昂,且调节作用仅局限于时间维度[4];常规一次设备如联络开关、分接头与投切电容器虽具有一定调控能力,但存在操作寿命有限、调节精度不足的问题[1];智能软开关通过背靠背变流器实现馈线间功率调节,虽具有一定潮流控制灵活性,但其投资成本高、占地需求大[5],调控能力受端口规模与接入位置限制[6–7]。

随着电力电子技术发展与多能源协同趋势增强,电能路由器(energy router,ER)被工程化应用,并成为构建能源互联网的关键要素[8–9]。ER以固态变压器为核心,构建多端口架构[10],具备交直流互联、电压变换与电气隔离能力,支持分布式资源即插即用、功率双向灵活调节与能量流向智能控制[11]。Lin等[12]构建了通用建模框架,验证ER可提升配电网的负荷接纳与潮流调控能力;魏皓天[13]、仇书山[14]和杜云飞[15]等从多设备调度、电压质量改善与区域功率协调等角度出发,论证了ER在运行优化方面的优势;在拓扑优化方面,Zhao等[16]指出ER的灵活重构能力使其在配网功率灵活传输与能量流动控制方面具有独特优势,刘科

收稿日期:2025 – 06 – 23　　**修回日期:**2025 – 08 – 16　　**网络出版日期:**2025 – 11 – 13
基金项目:四川省自然科学基金项目(2024NSFSC0870)
作者简介:范梓远(2001—),男,硕士生. 研究方向:电力系统运行优化与规划. E-mail:fanziyuan@stu.scu.edu.cn
* **通信作者:**余雪莹,助理研究员, E-mail:yuxueying@scu.edu.cn

研等[17]则通过图论方法研究多ER互济机制，提升台区间的能量互联水平。上述研究表明，ER具备功率灵活调度与分布式资源即插即用能力，在增强配电网局部自治与智能化运行方面发挥了关键作用，是构建新型主动配电系统的重要支撑技术。

尽管ER已成为提升配电网性能的重要手段，但现有规划研究普遍缺乏对其部署数量、连接方式与容量配置等关键要素的全面协同考量。Syed等[18]的研究聚焦于单台ER的连接方式与端口容量设计，但并未涉及多设备间的协调机制；Chen等[19]通过优化ER部署位置的选择逻辑实现配网源荷分布相对均衡，但研究范围仍局限于单ER场景。然而，Liu等[20]的研究表明，多台ER的协同部署能有效提升配电网的经济性与电能质量，凸显多ER配置在系统性能优化中的重要性。Chen等[21]进一步提出面向多个配电网的ER规划策略，以实现基于ER的点对点能源交易，但其端口容量配置机制不明确，部署节点选择亦缺乏依据。综上所述，现有研究多集中于单一或部分要素，难以充分释放ER在多源协调与功率控制方面的潜力，亟需构建面向多要素协同的系统规划方法。

ER多要素协同配置的复杂性主要源于配电网结构日益复杂，需同时应对多源供电、不确定波动与潮流双向等耦合因素，使得传统优化方法在变量规模控制与策略设计上面临严峻挑战，难以有效支撑高效部署与灵活调控的实际需求[22−23]。复杂网络理论作为一种结构化建模工具，可从配电网的连接关系与运行特性中提取关键结构信息，在压缩变量维度的同时为多要素优化问题提供高效解法。区域划分作为复杂网络分析中的关键手段，能够识别拓扑或功能相近的子结构单元并降低全局优化复杂度，因此在ER多要素配置中具有重要应用前景[24−25]。已有研究将复杂网络方法应用于ER规划，通过优化网络结构、引入社团划分或构建加权图模型[26]，实现一定程度的结构简化与协同优化[27]。然而，相关方法多依赖静态拓扑或设备参数，无法有效反映配电网运行状态的动态演化过程，难以支撑多源波动、负荷变化等复杂场景下的高效决策。

综上所述，本文针对现有ER规划中多要素协同不足与运行特性考虑不全的问题，提出基于区域划分的ER系统化规划方法，以提升配置决策的科学性与配电网运行的综合性能。首先，引入虚拟节点对ER进行建模，构建可兼容多端口特性的配电网网络模型。其次，设计面向多ER的两阶段优化策略：第1阶段基于复杂网络区域划分与源荷重心识别，确定ER的部署数量与节点位置；第2阶段构建双层规划模型，基于DG与负荷波动的不确定场景开展端口连接关系设计与容量配置优化。最后，通过算例仿真验证所提方法在提升新能源接纳能力、运行经济性与电压稳定水平方面的有效性，为配电网中ER的科学部署与协调运行提供技术支撑。

1 配电网ER模型及其等效接入方式

为确保ER在配电网中的合理部署，首先构建适应配电网运行特性的ER结构模型。现有ER结构主要包括与配网节点相连的端口、交流电/直流电（alternating current/direct current，AC/DC）变换环节及公用直流母线。电网功率经由各端口输入ER，经AC/DC变换后汇入公用直流母线，进而实现统一的能量调度与分配。该结构旨在连接不同电压等级的节点，但在配电网的ER应用场景中，同一系统内所有节点处于相同电压等级，不存在跨电压等级连接。因此，ER内部的AC/DC变换与直流母线电压调整过程可视为与外部配电网隔离，且不受配电网潮流与电压约束条件的直接影响[28]。

在此基础上，引入虚拟节点表征配电网节点与ER端口的连接关系。ER端口虚拟节点模型如图1所示。图1中，节点i为配电网节点，节点j为与节点i相连的ER端口等效虚拟节点，P_i、Q_i分别为节点i向ER端口传输的有功、无功功率；P_j^{ER}、Q_j^{ER}为节点i传入端口j的功率。线路$L_{i,j}$为连接配电网节点i与ER端口j的新增线路，其阻抗由两部分构成：r_{ij}^{L}、x_{ij}^{L}分别为新增线路的电阻与电抗；r_{ij}^{ER}、x_{ij}^{ER}为表征该端口内部损耗的等效阻抗。

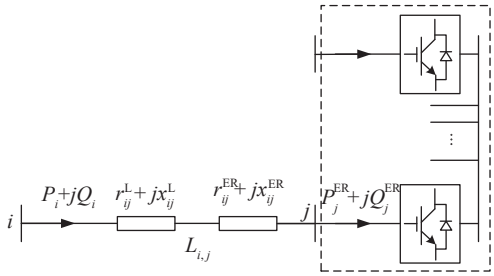


图1 ER虚拟节点模型

Fig. 1 Virtual node model of ER

由于ER内部损耗被等效至新增线路，端口传入的功率在ER内部可视为无损传输，因此采用对虚拟节点的约束条件描述ER的功率传输及潮流控制作用：

$$P_j=\sum_{i:\,i\to j}(P_{ij}-I_{ij}^2r_{ij}),j\in N^{\mathrm{ER}},i\in N^{\mathrm{DN}} \tag{1}$$

$$Q_j=\sum_{i:\,i\to j}(Q_{ij}-I_{ij}^2x_{ij}),j\in N^{\mathrm{ER}},i\in N^{\mathrm{DN}} \tag{2}$$

$$P_j^2+Q_j^2\le S_j^2,j\in N^{\mathrm{ER}} \tag{3}$$

$$\sum_{j\in N^{\mathrm{ER}}}P_j=0 \tag{4}$$

式(1)～(4)中：P_j、Q_j分别为注入虚拟节点j的有功、无

功功率；P_{ij}、Q_{ij}、I_{ij}分别为配电网节点i向相邻虚拟节点j传输的有功功率、无功功率和电流；x_{ij}、r_{ij}分别为配电网节点与ER端口新增线路的等效电阻与电抗；S_j为虚拟节点j代表的端口容量；N^{ER}、N^{DN}分别为虚拟节点和配电网节点的集合。式(1)、(2)为ER端口注入功率等式；式(3)约束端口传输功率不超过额定容量；式(4)为ER内部功率平衡约束，即ER仅传输功率，不消耗或产生功率。

通过引入虚拟节点等效方法，ER的功率交换与潮流控制功能被纳入配电网运行框架，整体建模得以简化。其各端口的功率交互以虚拟节点注入表示，传输过程则等效为新增节点与原节点之间的潮流关系，从而使部署与配置分析聚焦于实际节点与虚拟节点之间的耦合特性。

2　基于区域划分的ER部署策略

本节结合复杂网络区域划分与节点重心分析，构建ER初步部署策略，确定其选址与数量。首先以线路电气介数构建节点耦合权重，采用Louvain算法划分子区域，明确最大部署数量；再以电源矩与负荷矩识别各子区域的源荷重心，将其作为ER的候选部署节点，为后续配置优化奠定基础。

2.1　基于Louvain算法的配电网区域划分

采用社区检测方法将配电网划分为若干内部连接紧密、外部耦合较弱的子区域，以识别节点间关联强度及DG的作用范围。区域划分以最大化模块度为目标，模块度数值越高表明社区结构越清晰[29]。

为应用社区检测方法，首先将配电网抽象为复杂网络模型，节点间的耦合强度由线路权重来表征。采用线路电气介数作为线路权重，度量源荷功率传输对不同线路的依赖程度。线路电气介数计算方法为：

$$\omega_{ij}=\sum_{m\in G,n\in L}\sqrt{W_m W_n}\left|I_{ij}^{mn}\right| \tag{5}$$

式中：ω_{ij}为线路(i,j)的线路电气介数；G、L分别为配电网中电源与负荷节点集合；W_m为电源节点的权重，取电源的额定容量；W_n为负荷节点的权重，取有功负荷峰值；I_{ij}^{mn}为电源–负荷节点对(m,n)间施加单位注入电流后，在线路(i,j)上引起的电流。同时，源荷节点权重W_m、W_n均分别以系统内最大发电容量与最大负荷作为基准进行归一化处理，I_{ij}^{mn}表征单位电流元，因此ω_{ij}为无量纲值，具有可比性。

为实现模块度最大化，采用Louvain算法进行区域划分。该算法具有分区原理简单、计算复杂度低的优势，适用于大规模网络的快速划分；其通过自动迭代调整得到不同层次分区结果，不依赖预设分区数量，减少了人为主观因素干扰，具有较强的适应性和求解能力[29]。Louvain算法通过两个阶段迭代实现模块度优化。

1）模块度优化阶段。初始将每个节点视为独立子区域，逐一尝试将其合并至相邻子区域，通过模块度增量判断合并效果：

$$\Delta M_{\{g,a\}}=\Delta M_{\{a\in g\}}-\Delta M_{\{a\notin g\}} \tag{6}$$

$$M=\frac{1}{2m}\sum_{ij}\left(\omega_{ij}-\frac{k_i k_j}{2m}\right)\delta(i,j) \tag{7}$$

$$k_i=\sum_j\omega_{ij},\ m=\frac{1}{2}\sum_i k_i \tag{8}$$

式(6)～(8)中：$\Delta M_{\{g,a\}}$为节点a对子区域g的模块度增量，其数值为将节点a纳入子区域g前后的网络模块度差值；M为网络模块度；k_i为节点i的度数，即与节点i相连的所有线路的权重ω_{ij}之和；m为网络中所有线路的权重之和；$\delta(i,j)$为表征节点分区归属的二元状态变量，用于判断两个节点是否归属于同一个分区，当节点i与j同属一个分区时，其值为1，否则其值为0。

模块度函数对分区结果的结构强度作出量化评价，其取值范围为(–1, 1)，数值越高代表整体分区效果越好。在得到一个节点对所有相邻子区域的模块度增量后，将其置于模块度增量为正且取值最大的子区域内；对所有未进行区域划分且与已分区节点相邻的节点重复迭代该操作，直至网络中任意节点的分区操作均无法使该网络的总模块度增加。

2）网络凝聚阶段。将前一阶段生成的子区域视为新节点，重构高层网络，将边权设为对应子区域间原边权之和，随后再次执行优化阶段，直至整体模块度收敛，即：

$$\omega_{\{g,h\}}=\sum_{i\in g,j\in h}\omega_{ij},\ i\in i\to j \tag{9}$$

式中：g、h分别为第1阶段得到的两个子区域，在网络凝聚阶段被等效为两个新的节点；$\omega_{\{g,h\}}$为两个等效节点之间边的权重，等于连接两个子区域的所有线路权重ω_{ij}之和。Louvain算法两阶段的原理如附录A图A1所示，算法在两个阶段迭代进行，不断对子区域执行凝聚与模块度优化操作，直至整个网络的模块度不再增加。

2.2　配电网子区域源荷重心识别

完成区域划分后，各DG节点的影响范围得以明确。为进一步刻画局部源荷特性，识别各子区域的电源与负荷重心，用于辅助分析供需分布与功率流向[30]，并为ER部署提供参考。

源荷重心类比于均匀重力场中的质心，分别对应区域内DG与负荷的等效中心，其相对位置反映电源与负荷分布的空间偏移程度，同时揭示区域内功率流动方向与电压分布情况。

为统一不同子区域内的重心位置描述，引入区域

首节点作为参考基准。该节点定义为该子区域内与配电网根节点电气距离最近的节点，其中根节点即配电网与上级变电站或主干电网直接相连的节点[31]。各子区域的源荷重心位置均以首节点为参考原点。区域首节点可表示为：

$$N_g^{\text{nodeS}} = \underset{s\in g}{\arg\min}\left(\sum_{\substack{p\in P(r,s),\\(i,j)\in p}} R_{ij}\right) \tag{10}$$

式中，N_g^{nodeS} 为子区域 g 的首节点，r 为配电网根节点，$P(r,s)$ 为节点 r 至节点 s 的线路集合，R_{ij} 为线路 (i,j) 的电阻值。

参考质点系重心的计算方法，重心位置通过节点容量与位置向量加权平均得到[32]。其中，将电源容量与负荷需求分别视为质量，基于电气距离计算电源矩与负荷矩，用于确定源荷重心：

$$M_i^{\text{L}} = P_i^{\text{L}} R_i, i\in g, i\in N^{\text{L}} \tag{11}$$

$$M_i^{\text{G}} = P_i^{\text{G}} R_i, i\in g, i\in N^{\text{G}} \tag{12}$$

$$C_g^{\text{L}} = \sum_{i\in g, i\in N^{\text{L}}} M_i^{\text{L}} \Big/ \sum_{i\in g, i\in N^{\text{L}}} P_i^{\text{L}} \tag{13}$$

$$C_g^{\text{G}} = \sum_{i\in g, i\in N^{\text{G}}} M_i^{\text{G}} \Big/ \sum_{i\in g, i\in N^{\text{G}}} P_i^{\text{G}} \tag{14}$$

$$R_i = \sum_{k\in P_{is}} R_k \tag{15}$$

式(11)～(15)中：M_i^{L}、M_i^{G} 分别为子区域 g 中节点 i 的负荷矩与重心矩；C_g^{L}、C_g^{G} 分别为子区域 g 的负荷重心与电源重心至子区域 g 首节点的距离；N^{L}、N^{G} 为电网中负荷节点与电源节点的集合；P_i^{L} 为节点 i 的有功负荷；P_i^{G} 为节点 i 的有功输出；R_i 为节点 i 至子区域首节点 s 的电气距离，其值为节点 i 与节点 s 沿最短路径 P_{is} 的各线路电阻 R_k 之和。

子区域内源荷重心的相对位置反映了负荷与电源的空间布局关系，直接影响功率传输路径与子区域内电压偏移情况：

1)子区域负荷重心超前(即相较于电源重心更接近子区域首节点，$C_g^{\text{L}} < C_g^{\text{G}}$)，子区域的功率传输方式为从电源重心逆向传输至负荷重心，若电源功率充足还将向首节点反送；此类反向功率流动引发电压逐段上升，易导致越限风险并加重线路损耗。

2)子区域电源重心超前(即比负荷重心更接近子区域首节点，$C_g^{\text{G}} < C_g^{\text{L}}$)，虽可能存在向子区域首节点反向传输的功率，但电压越限风险较低；若电源重心过度超前，末端节点供电能力下降，则存在低电压隐患。

在实际计算中，基于 C_g^{G} 与 C_g^{L} 定位得到的子区域源荷重心可能与配电网中实际节点不重合。由于配电网的优化调度与规划部署通常以节点为研究对象，且为便于实施 ER 规划方案，需对源荷重心位置进行适当松弛，使其映射到一个实际存在的网络节点。该节点被定义为子区域的重心节点：

$$N_g^{\text{nodeL}} = \underset{i\in g}{\arg\min}\left(\left|R_i - C_g^{\text{L}}\right|\right) \tag{16}$$

$$N_g^{\text{nodeG}} = \underset{i\in g}{\arg\min}\left(\left|R_i - C_g^{\text{G}}\right|\right) \tag{17}$$

式(16)、(17)中：N_g^{nodeL}、N_g^{nodeG} 分别为子区域 g 的负荷重心节点与电源重心节点，二者分别为该子区域内与负荷重心、电源重心最接近的配电网节点。

源荷重心在松弛处理后可映射为具体节点，体现区域内源荷分布的集中趋势。ER 作为区域间功率协调的关键设备，其部署位置对潮流调控效果有重要影响。将 ER 部署于该节点，有助于实现局部供需匹配，提升功率调节的灵活性与精准性，优化潮流路径及区域间的能量分配。因此，将源荷重心映射节点设为 ER 的备选部署位置。

3 ER 双层规划模型

基于 ER 的虚拟节点建模与备选部署节点筛选，构建面向不确定性场景的 ER 双层规划模型。模型上层决策 ER 的部署数量与位置，下层在上层给定的参数下，考虑风电、光伏与负荷的不确定性，优化端口连接方案与容量配置。整体流程如附录 A 图 A2 所示。

3.1 上层规划：ER 最优选址策略

上层规划依据备选部署节点进行 ER 的全局部署。首先设定部署数量，其上限为配电网重心节点数量；然后在备选节点中部署若干 ER，形成所有可能的候选方案，并作为固定参数传递至下层。上层规划以总成本最低作为目标函数，包括 ER 的部署成本及配电网的运行配套成本：

$$\min f = f^{\text{ER}} + f^{\text{DN}} \tag{18}$$

式中：f^{DN} 为配电网的运行配套成本，由下层规划优化得到；f^{ER} 为 ER 的部署成本，其表达式如式(19)所示。

$$f^{\text{ER}} = n^{\text{ER}} C^{\text{ER}} \cdot \frac{\mu^{\text{ER}}(1+\mu^{\text{ER}})^{v^{\text{ER}}}}{(1+\mu^{\text{ER}})^{v^{\text{ER}}} - 1} \tag{19}$$

式中，n^{ER}、C^{ER}、μ^{ER}、v^{ER} 分别为 ER 的部署数量、成本、折现率与使用年限。

3.2 下层规划：ER 端口最优容量配置

确定 ER 部署位置与数量后，下层规划在风电、光伏及负荷不确定性条件下，优化各 ER 端口的连接结构与容量配置。该部分以典型运行日的系统运行成本最小为目标，构建含源荷不确定性的最优潮流模型，并引入两阶段可调鲁棒优化，保障多变场景下的调控安全与经济性。ER 端口最优容量配置的两阶段鲁棒优化模型为：

$$\begin{cases} \min\limits_{x\in\chi}\left(\boldsymbol{c}^{\text{T}}x + \max\limits_{\boldsymbol{u}\in\upsilon}\min\limits_{y\in\gamma(x,u)}(\boldsymbol{d}^{\text{T}}y + \boldsymbol{e}^{\text{T}}\boldsymbol{u})\right), \\ \text{s.t. } \boldsymbol{Ax}=\boldsymbol{g}, \boldsymbol{Bx}\le\boldsymbol{h}, \boldsymbol{Cx}+\boldsymbol{Dy}=\boldsymbol{i}, \boldsymbol{Ex}+\boldsymbol{Fy}\le\boldsymbol{j}, \boldsymbol{Gy}\le\boldsymbol{u} \end{cases} \tag{20}$$

式中：$\boldsymbol{c}$为第一阶段规划决策变量x对应的成本系数向量；$\boldsymbol{c}^{\mathrm{T}}x$表征ER端口容量配置及新增线路投建成本；$x$为代表ER容量配置与新增线路投建的决策变量；$\boldsymbol{u}$为扰动场景，代表分布式风电、光伏出力等的不确定性参数；υ为不确定性集合；y对应最恶劣场景下的配电网可调控量；$\gamma(x,u)$为运行可行域集合，依赖于x与u；$\boldsymbol{d}$为第二阶段可调运行变量y对应的成本系数向量；$\boldsymbol{e}$为不确定参数$\boldsymbol{u}$对应的成本系数向量；$\boldsymbol{A}$、$\boldsymbol{C}$、$\boldsymbol{D}$分别为等式约束的系数矩阵；$\boldsymbol{g}$、$\boldsymbol{i}$为对应约束的常数列向量；$\boldsymbol{B}$、$\boldsymbol{E}$、$\boldsymbol{F}$、$\boldsymbol{G}$分别为不等式约束的系数矩阵；$\boldsymbol{h}$、$\boldsymbol{j}$为对应约束的常数列向量。

3.2.1　不确定性参数

下层规划中的不确定性源于分布式光伏、风电出力以及负荷需求的随机性与波动性。为此，基于预测值构建扰动区间，对配电网中风、光、荷的不确定性进行建模：

$$\upsilon=\left\{u\in\left\{u_{i,t}^{\mathrm{PV}},u_{i,t}^{\mathrm{WT}},u_{i,t}^{\mathrm{LD}}\right\}\right\} \tag{21}$$

$$P_{i,t}^{\mathrm{PV}}=P_{i,t}^{\mathrm{PV,f}}(1+\delta^{\mathrm{PV}}u_{i,t}^{\mathrm{PV}}),u_{i,t}^{\mathrm{PV}}\in[-1,1] \tag{22}$$

$$P_{i,t}^{\mathrm{LD}}=P_{i,t}^{\mathrm{LD,f}}(1+\delta^{\mathrm{LD}}u_{i,t}^{\mathrm{LD}}),u_{i,t}^{\mathrm{WT}}\in[-1,1] \tag{23}$$

$$P_{i,t}^{\mathrm{WT}}=P_{i,t}^{\mathrm{WT,f}}(1+\delta^{\mathrm{WT}}u_{i,t}^{\mathrm{WT}}),u_{i,t}^{\mathrm{LD}}\in[-1,1] \tag{24}$$

式(21)～(24)中：$P_{i,t}^{\mathrm{PV}}$、$P_{i,t}^{\mathrm{WT}}$、$P_{i,t}^{\mathrm{LD}}$分别为节点i的分布式光伏、风电出力与负荷需求的实际值；$P_{i,t}^{\mathrm{PV,f}}$、$P_{i,t}^{\mathrm{WT,f}}$、$P_{i,t}^{\mathrm{LD,f}}$分别为节点i的分布式光伏、风电出力与负荷需求的预测值；$P_{i,t}^{\mathrm{PV,f}}$、$P_{i,t}^{\mathrm{WT,f}}$、$P_{i,t}^{\mathrm{LD,f}}$、δ^{PV}、δ^{WT}、δ^{LD}分别为分布式光伏、风电出力与负荷需求的最大扰动幅度；$u_{i,t}^{\mathrm{PV}}$、$u_{i,t}^{\mathrm{WT}}$、$u_{i,t}^{\mathrm{LD}}$分别为分布式光伏、风电出力与负荷需求的归一化扰动变量，代表对应扰动限制在预测值的上下扰动区间之内。

为避免最极端扰动在全调度周期内同时发生导致结果过度保守，引入可调鲁棒性参数对典型日内的扰动强度进行限制：

$$\sum_{t}\left(\frac{P(t)-P^{\mathrm{f}}(t)}{p_t^{+}}\rho_t^{+}+\frac{P^{\mathrm{f}}(t)-P(t)}{p_t^{-}}\rho_t^{-}\right)\le\Gamma \tag{25}$$

式中：$P(t)$、$P^{\mathrm{f}}(t)$分别为t时刻的实际功率与预测功率；p_t^{+}、p_t^{-}分别为功率波动上下限；ρ_t^{+}、ρ_t^{-}为相对大小判断标志位，$\rho_t^{+}=1$、$\rho_t^{-}=0$代表实际出力大于预测值，反之代表小于预测值；Γ为可调鲁棒参数，代表典型日内最多仅有若干时段设备处于极端扰动状态，其余时段各机组出力的实际值接近预测值。

3.2.2　目标函数

上述两阶段鲁棒优化模型中，第1阶段成本包括ER连接各节点的新增线路成本及端口容量配置成本，第2阶段成本为最恶劣场景下的配电网运行成本，各部分成本表达式为：

$$f^{\mathrm{OP}}=P^{\mathrm{Sub}}C^{\mathrm{Sub}}+P^{\mathrm{Loss}}C^{\mathrm{Loss}}+P^{\mathrm{PV}}C^{\mathrm{PV}}+P^{\mathrm{WT}}C^{\mathrm{WT}}+P^{\mathrm{PV,cur}}C^{\mathrm{PV,cur}}+P^{\mathrm{WT,cur}}C^{\mathrm{WT,cur}} \tag{26}$$

$$f^{\mathrm{Line}}=C^{\mathrm{Line}}\sum_{\substack{j\in N^{\mathrm{ER}},i\in N^{\mathrm{DN}}\\ i\in i\to j}}\delta_j r_{ij}\frac{\theta^{\mathrm{ER}}(1+\theta^{\mathrm{ER}})^{\pi^{\mathrm{ER}}}}{(1+\theta^{\mathrm{ER}})^{\pi^{\mathrm{ER}}}-1} \tag{27}$$

$$f^{\mathrm{Port}}=\sum_{j\in N^{\mathrm{ER}}}D_j\frac{\mu^{\mathrm{ER}}(1+\mu^{\mathrm{ER}})^{v^{\mathrm{ER}}}}{(1+\mu^{\mathrm{ER}})^{v^{\mathrm{ER}}}-1} \tag{28}$$

式(26)～(28)中：f^{OP}、f^{Line}、f^{Port}分别为配电网的运行成本、ER连接各节点的新增线路成本及ER的端口配置成本；P^{Sub}、C^{Sub}分别为配电网的主网购电功率与主网购电成本；P^{Loss}、C^{Loss}分别为配电网的传输损耗功率与传输损耗成本；P^{PV}、P^{WT}、C^{PV}、C^{WT}分别为分布式光伏、风电的发电功率与对应购电成本；$P^{\mathrm{PV,cur}}$、$P^{\mathrm{WT,cur}}$、$C^{\mathrm{PV,cur}}$、$C^{\mathrm{WT,cur}}$分别为分布式光伏、风电弃置功率与弃置惩罚成本；C^{Line}为新增线路建设成本；δ_j为线路投建状态的二元变量，0表示该线路及对应端口不投建；θ^{ER}与π^{ER}分别为新增线路的贴现率与寿命年限；D_j为虚拟节点j对应的ER端口的容量配置系数，为非负整数，代表每个端口配置容量为单位端口容量的整数倍。

下层规划中，假设各ER与所有备选节点均建立连接关系，基于此进行端口容量优化配置。根据配置结果判定端口启用状态与新增线路投建需求，容量配置为零的端口及其对应线路不予建设。

3.2.3　约束条件

含ER的配电网最优潮流需满足以下约束条件：

1)ER运行与配置约束

$$(P_{j,t}^{\mathrm{node}})^2+(Q_{j,t}^{\mathrm{node}})^2\le(D_jS^{\mathrm{node}})^2,j\in N^{\mathrm{ER}} \tag{29}$$

$$\sum_{j\in N_i^{\mathrm{ER}}}P_{j,t}^{\mathrm{node}}=0 \tag{30}$$

$$\sum_{j\in N_i^{\mathrm{ER}}}Q_{j,t}^{\mathrm{node}}=0 \tag{31}$$

式(29)为ER端口容量约束，限制端口功率不超过配置上限，S^{node}代表端口的单位端口容量；式(30)、(31)为能量传输约束，表示ER内部仅传导功率，不产生或消耗功率；$Q_{j,t}^{\mathrm{node}}$为节点j在t时刻从电网吸收的无功功率；N_i^{ER}为第i个ER的端口集合。

2)配电网运行相关约束

配电网运行相关约束包括节点功率平衡、线路传输平衡、节点电压约束和配电网运行约束，详见附录A。

3.2.4　基于C&CG与对偶的模型转化

上述模型目标函数中包含max–min嵌套结构，直接求解具有较高的计算复杂度。因此采用C&CG方法将原问题拆解为主问题(master problem，MP)与子问题(sub-problem，SP)交替迭代求解的结构。同时，对SP作

对偶处理，并考虑可调鲁棒参数Γ对最恶劣场景发生次数的限制，最终得到MP与SP分别如式(32)、(33)所示。

$$\begin{cases}\min\limits_{x\in\chi,\,y^n\in\gamma(x,u)} (\boldsymbol{c}^{\mathrm{T}}x+\theta),\\ \text{s.t. } \theta\geq \boldsymbol{d}^{\mathrm{T}}y^n+\boldsymbol{e}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{u}\end{cases} \tag{32}$$

$$\begin{cases}\max\limits_{u\in v,\lambda,\mu\geq 0,\,v\geq 0}\Bigg(\boldsymbol{\lambda}^{\mathrm{T}}(\boldsymbol{i}-\boldsymbol{C}x)+\boldsymbol{\mu}^{\mathrm{T}}(\boldsymbol{j}-\boldsymbol{E}x)+\\ \qquad\sum\limits_{w}(\xi_w^{+}\overline{u_w}+\xi_w^{-}\underline{u_w}+(1-\mu_w^{+}-\mu_w^{-})\boldsymbol{u})\Bigg),\\ \text{s.t. } \boldsymbol{D}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{\lambda}+\boldsymbol{F}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{\mu}+\boldsymbol{G}^{\mathrm{T}}v^{+}+\boldsymbol{G}^{\mathrm{T}}v^{-}=\boldsymbol{d},\boldsymbol{\xi}=\boldsymbol{e}+\boldsymbol{v},\\ \quad -M(1-\mu_w^{+})+\xi_w\leq\xi_w^{+}\leq M(1-\mu_w^{+})+\xi_w,\\ \quad -M(1-\mu_w^{-})+\xi_w\leq\xi_w^{-}\leq M(1-\mu_w^{-})+\xi_w,\\ \quad \mu_w^{+}+\mu_w^{-}\leq 1,\ \sum\limits_{w}(\mu_w^{+}+\mu_w^{-})\leq\Gamma\end{cases} \tag{33}$$

式(32)～(33)中：k为迭代次数；$\boldsymbol{\lambda}$、$\boldsymbol{\mu}$、$\boldsymbol{v}$分别为SP中等式约束、不等式约束及不确定参数约束的对偶变量；$\overline{u_w}$、$\underline{u_w}$分别为第w个不确定参数波动的上下极限；μ_w^{+}、μ_w^{-}为Big-M法的辅助变量，用于表征不确定参数的实际取值状态，$\mu_w^{+}=1$、$\mu_w^{-}=0$代表此时不确定参数取波动区间上限，反之表示取波动区间下限；v^{+}、v^{-}为子问题对偶化过程中引入的对偶变量，分别对应不确定参数约束的正、负方向；ξ_w为对偶化后的辅助变量，由原目标函数中不确定参数的成本系数与相应对偶变量共同构成，即满足$\xi_w=e_w+v_w$，用于表征第w个不确定参数变化对对偶子问题目标函数的影响。

通过上述转化，原问题被解耦并简化为混合整数线性优化的MP与SP，可由商业求解器进行计算。

3.3 ER规划结果评价指标

在区域划分基础上，针对ER的规划结果，从电网运行经济效益、电网电压偏移、DG消纳水平及ER工作效率4个方面进行评估。

1)电网经济效益指标

设计降本率(cost reduction rate，CRR)与ER投资回报率(return on investment，ROI)指标，可分别用于衡量电网总成本的降低程度与ER投资的经济收益：

$$E^{\mathrm{CRR}}=\frac{f^{\mathrm{ori}}-f^{\mathrm{pla}}}{f^{\mathrm{ori}}}\times 100\% \tag{34}$$

$$E^{\mathrm{ROI}}=\frac{f^{\mathrm{ori}}-f^{\mathrm{pla}}}{f^{\mathrm{ER}}+f^{\mathrm{Line}}+f^{\mathrm{Port}}}\times 100\% \tag{35}$$

式(34)、(35)中：E^{CRR}为CRR指标，为规划ER之后的成本f^{pla}相较于无ER工况下成本f^{ori}的下降幅度；E^{ROI}为ROI指标，为规划ER前后降低的成本与ER投建成本的比值。

2)电网运行性能指标

从DG消纳率和节点电压偏移水平两个维度，评估ER在提升配电网可再生能源消纳能力及电压稳定性方面的作用：

$$G^{\mathrm{DG}}=\frac{\sum\limits_{t}\left(\sum\limits_{j\in N^{\mathrm{PV}}}\left(P_{j,t}^{\mathrm{PV}}-P_{j,t}^{\mathrm{PV,cur}}\right)+\sum\limits_{k\in N^{\mathrm{WT}}}\left(P_{k,t}^{\mathrm{WT}}-P_{k,t}^{\mathrm{WT,cur}}\right)\right)}{\sum\limits_{t}\left(\sum\limits_{j\in N^{\mathrm{PV}}}P_{j,t}^{\mathrm{PV}}+\sum\limits_{k\in N^{\mathrm{WT}}}P_{k,t}^{\mathrm{WT}}\right)} \tag{36}$$

$$G^{\mathrm{V}}=\sum_{j\in N^{\mathrm{DN}}}\left(\frac{U_{j,t}-U^{*}}{U^{*}}\right)^{2} \tag{37}$$

式(36)、(37)中，G^{DG}、G^{V}分别为配电网的DG消纳率与电压偏移水平，N^{PV}、N^{WT}分别为配电网内接入分布式光伏与分布式风机的节点集合，U^{*}为配电网基准电压。

3)ER工作效率

采用ER各时刻端口传输视在功率平方与端口配置容量平方的比值，表征ER的工作效率：

$$F^{\mathrm{ER}}=\frac{\sum\limits_{t}\sum\limits_{j\in N^{\mathrm{ER}}}\left(\left(P_{j,t}^{\mathrm{node}}\right)^{2}+\left(Q_{j,t}^{\mathrm{node}}\right)^{2}\right)}{T\cdot\sum\limits_{j\in N^{\mathrm{ER}}}\left(D_jS^{\mathrm{node}}\right)^{2}}\times 100\% \tag{38}$$

4 算例分析

基于改进IEEE–33节点配电网系统设计算例仿真。系统基准功率为10 MVA，基准电压为12.66 kV，在节点9、16、30接入分布式风电机组，在节点17、20、27接入分布式光伏机组。算例中涉及的主要参数如附录B表B1所示，典型日的分布式机组出力如附录B图B1所示，负荷需求、各时段的分时电价如附录B图B2所示。

4.1 算例1：ER优化配置模型有效性分析

为验证所提ER优化配置模型的有效性，设计3种方案并对比其性能指标：

方案1：配电网原始场景，未进行区域划分及ER规划；

方案2：使用本文所提方法进行区域划分并对ER进行规划；

方案3：未进行区域划分，使用文献[19]中的方法对单台ER进行规划。

对于方案2，首先对配电网进行区域划分与子区域重心识别，分区结果如图2所示，基于区域划分与重心识别结果得到的ER规划结果如表1所示。

对于方案3，采用文献[19]中的ER规划策略，即在IEEE–33节点系统中假设单台ER具备与全部节点相

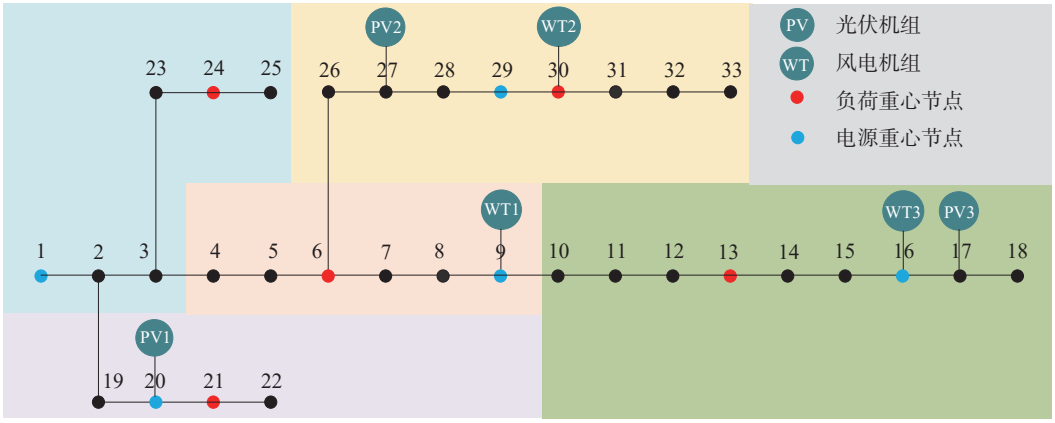


图2　配电网分区与重心识别结果

Fig. 2　Results of distribution network partitioning and centroid identification

表1　ER规划结果

Tab. 1　ER planning results

ER编号	部署节点	连接节点	容量/kVA
1	1	1	280
		13	280
2	30	30	210
		24	210

连的33个备选端口，并在规划过程中逐步删除未配置容量的端口；通过遍历ER在各节点的部署位置并制定相应的端口容量配置方案，选取降本率最高者作为最优方案。结果显示，ER部署于节点29时系统成本最低，连接至节点29、1、18、30，端口容量分别为60、210、70和50 kW。

3种方案下配电网经济效益如表2所示。结果表明，两种ER规划方法均显著降低了弃风弃光惩罚成本，实现了100%的DG消纳。相较于原始方案，本文方法（方案2）的CRR为27.14%，较方案3提升2.8%；ROI为17.29%，较方案3提升82%。

表2　不同方案配电网经济效益

Tab. 2　Economic benefits of distribution networks in different scenarios

指标	总成本/万元	弃风弃光惩罚成本/万元	ER部署成本/万元	新增线路成本/万元	端口配置成本/万元	CRR/%	ROI/%
方案1	1 069.56	224.78					
方案2	779.26	0	2.04	6.77	7.99	27.14	17.29
方案3	787.18	0	1.02	25.28	3.42	26.40	9.50

图3展示了3种方案下配电网在不同时间节点的电压偏移水平。结果表明，引入ER后，两种方案的节点电压偏移均得到显著改善；除中午10:00—14:00外，方案2均优于方案1和方案3，综合性能在三者中最优。3种方案的最大电压偏移均出现在21:00点；相较于方案1，方案3电压偏移下降17.18%，方案2下降48.73%，方案2较方案3进一步降低38.10%。

在ER工作效率方面，方案2、方案3的ER典型日平均工作效率分别为96.1%、95.8%，二者数值较为接近，两类方案不同时刻下的ER工作效率如图4所示。对比结果表明，方案2在多数时段内的工作效率均优于方案3，尤其在9:00—19:00与22:00—23:00等负荷高峰时段，ER端口达到100%满负荷运行，体现出更高的资源调度能力与端口利用率。相比之下，方案3的效率始终维持在95%左右，尽管波动幅度较小，但调度潜力有限。

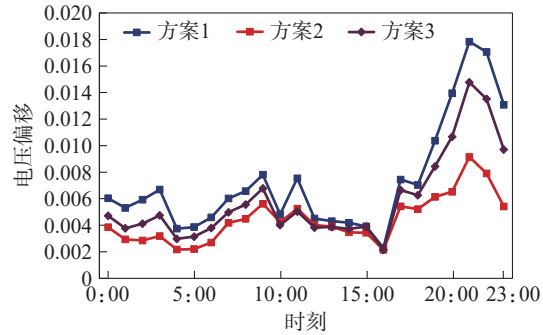


图3　不同方案电压偏移水平

Fig. 3　Voltage offset levels of different scenarios

综合分析可知，本文方法在运行经济性与性能方面均具有优势：年总成本显著下降，ER的ROI指标优于文献[19]；DG消纳率达100%，能源利用效率显著提升；电压稳定性增强，在最大电压偏移场景下表现突出；ER整体工作效率高、满负荷运行时间长，显著提升了系统运行效率与端口利用率。

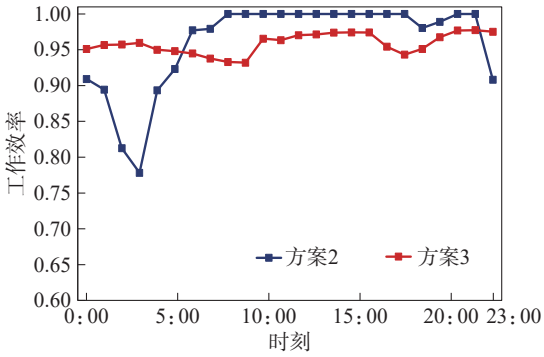


图4 不同方案各时刻ER工作效率

Fig. 4 ER work efficiency of different scenarios

4.2 算例2:ER规划结果影响因素分析

4.2.1 ER部署数量影响

ER的最大部署数量由配电网子分区数量决定。图5展示了不同部署数量下系统的总成本、运行成本与ROI指标。随着部署数量从1增至3,相较于无ER工况,运行成本分别下降26.40%、27.33%、27.10%,表明部署多台ER有助于提升运行经济性。但考虑ER本体、端口配置及新增线路等成本后,总成本呈先降后升的变化趋势,在部署2台ER时取得最小值,此时ROI达到最大值,分别较部署1台、3台ER时高出16.67%、18.99%。上述结果表明,适度部署ER可在投资与收益间实现最优平衡。

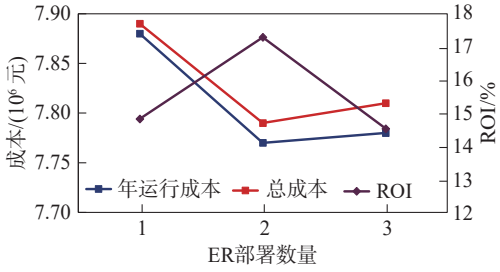


图5 不同ER部署数量的成本与ROI

Fig. 5 Cost and ROI for different number of ER

图6、7分别为不同部署数量N下的电压偏移与ER工作效率。结果表明,在21:00出现最大电压偏移时,3种部署方案较无ER工况分别下降24.2%、48.7%、31.8%。部署2台与3台ER的电压改善效果相近,电压偏移水平相较于仅部署1台与不部署ER工况均有所改善,但继续增加ER数量,系统的进一步改善效果则会变差。

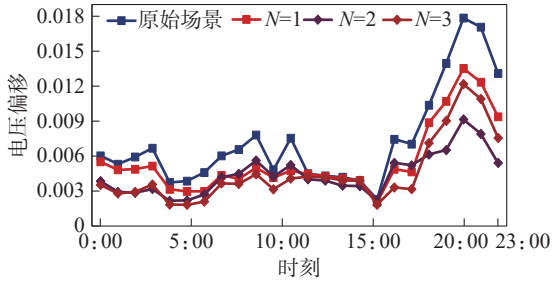


图6 不同ER部署数量电网电压偏移

Fig. 6 Voltage offsets with different numbers of ER deployed

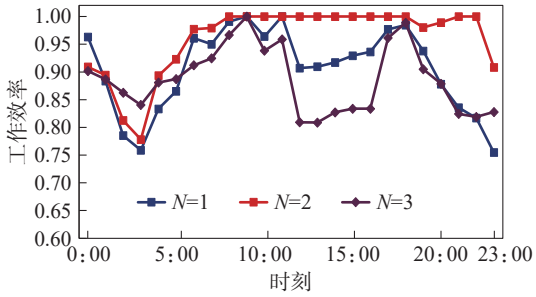


图7 不同部署数量ER的工作效率

Fig. 7 Efficiency of ER under different deployment quantities

在ER工作效率方面,3种方案的典型日平均效率分别为90.6%、96.1%和88.7%。在典型日内的不同时段,各方案均在早晚高峰阶段表现出较高的工作效率。其中,部署2台ER在12:00—23:00时段的效率始终高于其他方案,且全天各时段均保持较高水平,即部署2台ER可在整个典型日内保持较优的工作性能。

4.2.2 ER端口单位容量影响

在配置ER时,各端口容量设置为单位端口容量的整数倍。为分析单位端口容量对系统规划的影响,在保持单位端口容量每千伏安成本不变的前提下,设置4种单位端口容量配置:10 kVA(配置1)、20 kVA(配置2)、50 kVA(配置3)、100 kVA(配置4)。4种配置下,ER规划结果的部署位置与连接节点保持一致,各端口容量接近;总成本分别为779.26万元、780.91万元、779.71万元和783.14万元。结果表明,单位端口容量增加,系统经济性略有下降。

图8、9分别为配置方案下的电网电压偏移与ER工作效率,可见配置1电压偏移水平整体最低,具备更优的电压调控能力。同时,配置1对应的ER可取得最高的平均工作效率,大部分时刻效率高于其余方案,且ER端口满负荷运行时间最长,展现出较强的端口资源利用能力。

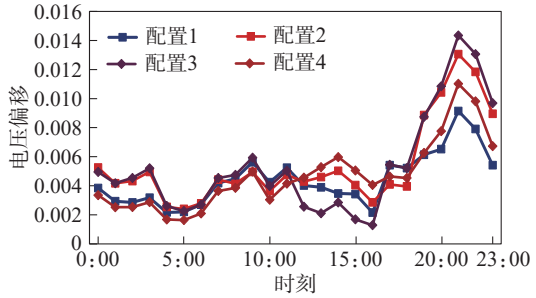


图8 不同配置方案电网电压偏移

Fig. 8 Voltage offsets of different configuration schemes

综上所述,较小的单位端口容量提升了ER配置的灵活性与精度,使容量分配更贴合电网需求,既优化了调度性能,又增强了电压调控能力。在每千伏安成本相同的条件下,减小单位端口容量有助于提升系统综合效益。

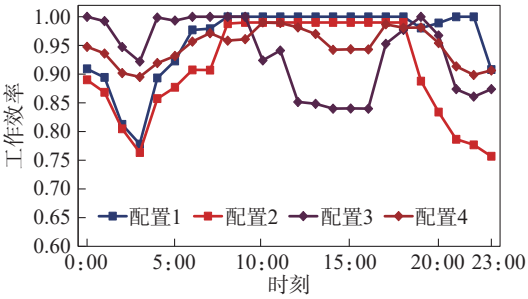


图9　不同配置方案ER工作效率

Fig. 9　ER work efficiency of different configuration schemes

4.3　算例3：不同DG渗透率下ER规划结果分析

为评估所提ER规划方法在不同DG渗透率下的适应性，设定4种DG渗透率场景，渗透率系数分别为1.0、1.2、1.4、1.6，其余条件保持一致，规划结果如附录B表B2所示。结果表明，ER的部署节点与连接节点随DG渗透率变化保持较高一致性，仅在最高渗透率场景下新增一台ER，以满足额外的局部功率传输需求。

不同DG出力系数的经济效益如图10所示，可见系统CRR与ROI指标随DG渗透率上升而提升，并在场景4中达到峰值，表明ER在高DG渗透率下的经济优势更加明显。图11进一步表明，4种场景下ER平均工作效率分别为96.1%、93.8%、93.4%、92.2%，随DG渗透率上升整体呈略微下降趋势。其原因如下：在DG高出力时段，ER需更好地保障电网经济性与风光消纳水平，因此配置了较高的端口容量，在部分低出力时段会出现端口冗余；但在不同渗透率水平下，ER整体工作效率仍维持在较高水平，体现出所提方法在不同出力水平下的稳健性与经济性。

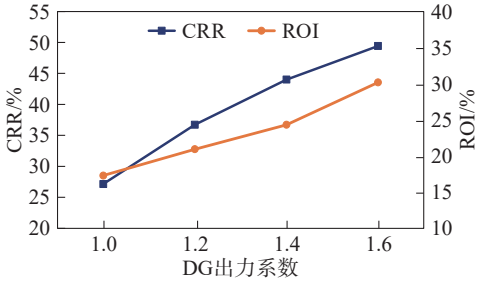


图10　不同DG出力系数的经济效益

Fig. 10　Economic benefits of different DG output coefficients

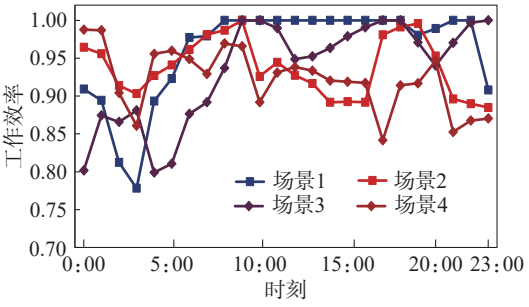


图11　不同场景的ER工作效率

Fig. 11　ER work efficiency of different scenarios

对ER规划结果进行分析可知，对于高比例DG接入的配电网，ER的部署不仅更具成本效益，还能实现更高的投资回报。此外，不同出力水平下的运行结果进一步验证了ER在运行效率方面的适应性。随着DG出力的提升，ER在高出力时段展现出更强的端口调用能力与资源调度能力，有效保障了DG的就地消纳。尽管在出力较低时段存在部分容量冗余，但整体工作效率仍维持在较高水平，反映出该规划方法在提升资源利用率和系统经济性方面的协同优势。

5　结　论

针对高比例DG接入和辐射状拓扑带来的潮流反送、电压偏差等问题，本文提出一种基于区域划分的ER优化规划方法。该方法首先引入虚拟节点构建含ER的配电网模型，在此基础上通过区域划分识别源荷重心节点作为部署候选，再结合双层规划模型优化ER的数量、连接方式和容量配置，有效提升了系统经济性与可再生能源的消纳能力，改善了电网运行性能。研究结果表明：

1）所提区域划分与重心识别方法能准确提取拓扑特征和运行特性，为ER部署提供选址参考，并有效降低规划问题复杂度，提升求解效率。

2）通过引入虚拟节点对ER进行建模，明确刻画了ER的功率传输与潮流控制功能，同时结合所构建的双层规划模型，实现了配电网中ER从部署到配置的全流程优化。

3）仿真结果验证了所提方法在不同运行场景下均具有良好的经济性、适应性与稳定性。相较于传统单ER部署方式，多ER协调配置在系统成本、电压质量和设备效率之间实现了更优平衡，同时提高了资源利用率与规划精度。进一步分析表明，随着DG出力水平的提升，所提方法在CRR、ROI及端口利用效率方面均表现出良好的性能，显示出对不同运行条件的良好适应能力。

附录见本刊网络版，扫描标题旁的二维码可阅读网络全文。

参考文献：

[1] Zhao Zhengming,Feng Gaohui,Yuan Liqiang,et al.The development and key technologies of electric energy router[J].Proceedings of the CSEE,2017,37(13):3823–3834.[赵争鸣,冯高辉,袁立强,等.电能路由器的发展及其关键技术[J].中国电机工程学报,2017,37(13):3823–3834.]

[2] Li Feng,Ding Jie,Zhou Caiqi,et al.Key technologies of large-scale grid-connected operation of distributed photovoltaic under new-type power system[J].Power System Technology,2024,48(1):184–196.[栗峰,丁杰,周才期,等.新型电力系

统下分布式光伏规模化并网运行关键技术探讨[J]. 电网技术,2024,48(1):184–196.]

[3] Kakigano H, Miura Y, Ise T. Distribution voltage control for DC microgrids using fuzzy control and gain-scheduling technique[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2013, 28(5):2246–2258.

[4] Gui Yonghao, Nainar K, Bendtsen J D, et al. Voltage support with PV inverters in low-voltage distribution networks: An overview[J]. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, 2024, 12(2):1503–1522.

[5] Xiao Jun, Gang Fayun, Jiang Xun, et al. Flexible distribution network: Definition, morphology and operation mode[J]. Power System Technology, 2017, 41(5): 1435–1442. [肖峻, 刚发运, 蒋迅, 等. 柔性生配电网:定义、组网形态与运行方式[J]. 电网技术, 2017, 41(5):1435–1442.]

[6] Zhang Shizhong, PeiI Wei, Yang Yanhong, et al. Optimization and analysis of multi-microgrids integration and aggregation operation based on flexible DC interconnection[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2019, 34(5): 1025–1037. [张释中, 裴玮, 杨艳红, 等. 基于柔性直流互联的多微网集成聚合运行优化及分析[J]. 电工技术学报, 2019, 34(5):1025–1037.]

[7] Jiang Xun, Zhou Yue, Ming Wenlong, et al. An overview of soft open points in electricity distribution networks[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2022, 13(3):1899–1910.

[8] Tian Shiming, Luan Wenpeng, Zhang Dongxia, et al. Technical forms and key technologies on energy Internet[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(14): 65–66. [田世明, 栾文鹏, 张东霞, 等. 能源互联网技术形态与关键技术[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(14):65–66.]

[9] Wen Wusong, Zhao Zhengming, Yuan Liqiang, et al. Decoupling control strategy for multi-function-form realization of medium-voltage AC port of electric energy router[J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(2):702–714. [文武松, 赵争鸣, 袁立强, 等. 电能路由器中压交流端口多形态的多维解耦控制[J]. 中国电机工程学报, 2022, 42(2):702–714.]

[10] Qiu Shushan, Mao Chengxiong, Ma Chunyan, et al. Cooperative operation optimization of distribution network and multi-microgrid integrated energy system based on energy router[J]. High Voltage Engineering, 2022, 48(12):5024–5036. [仇书山, 毛承雄, 马春艳, 等. 基于能源路由器的配电网与综合能源微网群协同运行优化[J]. 高电压技术, 2022, 48(12):5024–5036.]

[11] Cong Fanping, Zhou Jianping, Mao Dajun, et al. Reactive power optimization of power system with electric energy router applying modified teaching-learning algorithm[J]. Electric Power Construction, 2022, 43(6):110–118. [从帆平, 周建萍, 茅大钧, 等. 基于改进教与学算法的含电能路由器的电力系统无功优化[J]. 电力建设, 2022, 43(6):110–118.]

[12] Lin Junhao, Li V O K, Leung K C, et al. Optimal power flow with power flow routers[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2017, 32(1):531–543.

[13] Wei Haotian, Zhang Zhanqiang, Meng Keqilao, et al. Research on energy optimal scheduling of multi electric energy router system[J]. Foreign Electronic Measurement Technology, 2022, 41(7):69–74. [魏皓天, 张占强, 孟克其劳, 等. 多电能路由器系统能量优化调度研究[J]. 国外电子测量技术, 2022, 41(7):69–74.]

[14] Qiu Shushan, Chen Jinfan, Mao Chengxiong, et al. Coordinated dynamic optimization of AC–DC interconnected distribution network based on energy router[J]. High Voltage Engineering, 2023, 49(1): 147–158. [仇书山, 陈劲帆, 毛承雄, 等. 含能源路由器的交直流互联配电网协调动态优化[J]. 高电压技术, 2023, 49(1):147–158.]

[15] Du Yunfei, Yin Xianggen, Lai Jinmu, et al. Hierarchical energy optimization based on electric energy router for distribution network in stable operation and fault recovery[J]. Electric Power Automation Equipment, 2022, 42(4):154–164,171. [杜云飞, 尹项根, 赖锦木, 等. 基于电能路由器的配电网稳定运行与故障恢复分层能量优化[J]. 电力自动化设备, 2022, 42(4):154–164,171.]

[16] Zhao Xiaojun, Liu Yingrui, Chai Xiuhui, et al. Multimode operation mechanism analysis and power flow flexible control of a new type of electric energy router for low-voltage distribution network[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2022, 13(5):3594–3606.

[17] Liu Keyan, Sheng Wanxing, Zhao Pengjie, et al. Distributed control strategy of photovoltaic cross-district based on consistency algorithm[J]. High Voltage Engineering, 2021, 47(12):4431–4439. [刘科研, 盛万兴, 赵鹏杰, 等. 基于一致性算法的跨台区光伏分布式控制策略[J]. 高电压技术, 2021, 47(12):4431–4439.]

[18] Syed I, Khadkikar V, Zeineldin H H. Loss reduction in radial distribution networks using a solid-state transformer[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2018, 54(5):5474–5482.

[19] Chen Meifu, Xia Mingchao, Chen Qifang. Two-stage planning method for energy router considering its optimal operation in distribution networks[J]. CSEE Journal of Power and Energy Systems, 2024, 10(2):605–616.

[20] Liu Bin, Zhu Bingzhao, Guan Ziyou, et al. Energy router interconnection system: A solution for new distribution network architecture toward future carbon neutrality[J]. Energy Conversion and Economics, 2022, 3(4):181–200.

[21] Chen Meifu, Xia Mingchao, Chen Qifang. A planning model of energy routers considering peer-to-peer energy transaction among multiple distribution networks[J]. CSEE Jour-

nal of Power and Energy Systems,2024,10(3):1026–1043.

[22] Miao Jianqiang, Zhang Ning, Kang Chongqing. Generalized steady-state model for energy router with applications in power flow calculation[C]//Proceedings of the 2016 IEEE Power and Energy Society General Meeting (PESGM). Boston:IEEE,2016.

[23] Guo Hui, Wang Fei, Luo Jian, et al. Review of energy routers applied for the energy Internet integrating renewable energy[C]//Proceedings of the 2016 IEEE 8th International Power Electronics and Motion Control Conference (IPEMC-ECCE Asia). Hefei:IEEE,2016.

[24] Yue Jingpeng, Cai Subin, Xie Ning, et al. Research on distribution network topology and energy management considering energy router port interconnection[C]//Proceedings of the 2020 IEEE 4th Conference on Energy Internet and Energy System Integration (EI2). Wuhan:IEEE,2020.

[25] Wang Chenlei, Xie Da, Gu Chenghong. Physical layer model and configuration strategy of energy router based on the complex network theory[J]. Proceedings of the CSEE, 2023, 43(7):2666–2676.[王晨磊,解大,顾承红. 基于复杂网络理论的能源路由器物理层模型及配置策略[J]. 中国电机工程学报,2023,43(7):2666–2676.]

[26] Wang Ruichi, Wu Jiande, Qian Zhongnan, et al. A graph theory based energy routing algorithm in energy local area network[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2017, 13(6):3275–3285.

[27] Guo Hui, Wang Fei, Zhang Lijun, et al. A hierarchical optimization strategy of the energy router-based energy Internet[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2019, 34(6): 4177–4185.

[28] Zhang Peng, Lyu Gongxiang, Liu Zhijie, et al. Load transfer flexibility analysis of distribution network with electric energy routers[J]. Journal of Shanghai Jiao Tong University, 2023, 57(5):513–520.[张蓬,吕恭祥,刘志杰,等. 含电能路由器的配电网转供灵活性量化分析[J]. 上海交通大学学报,2023,57(5):513–520.]

[29] Newman M E J, Girvan M. Finding and evaluating community structure in networks[J]. Physical Review E, 2004, 69(2):026113.

[30] Seifikar M, Farzi S, Barati M. C-blondel: An efficient Louvain-based dynamic community detection algorithm[J]. IEEE Transactions on Computational Social Systems, 2020, 7(2): 308–318.

[31] Wei Xinrong, Wu Junyong, Ding Ran, et al. Distributed PV hosting capacity calculation of distribution network based on PV barycenter theory[J]. Power System Technology, 2023, 47(11):4533–4544.[魏欣荣,吴俊勇,丁然,等. 基于光伏重心理论的配电网分布式光伏最大准入容量计算[J]. 电网技术,2023,47(11):4533–4544.]

[32] Wei Xinrong. Research on the maximum hosting capacity of distributed photovoltaics in distribution network based on PV barycenter[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2023.[魏欣荣. 基于光伏重心的配电网分布式光伏最大准入容量研究[D]. 北京:北京交通大学,2023.]

Planning Strategy for Energy Routers in Distribution Networks Based on Partitioning

FAN Ziyuan, *YU Xueying**, *LI Huaqiang*, *LIU Yang*, *WEI Zhenbo*, *ZHOU Yi*

(College of Electrical Engineering, Sichuan University, Chengdu 610065, China)

Abstract:

Objective The energy router (ER) is an intelligent power electronic device that features bidirectional regulation and multiport interconnection, enabling efficient coordination among diverse energy types and voltage levels. However, ER planning involves multiple interdependent factors, including deployment locations, connection topologies, and capacity allocation, resulting in a complex, high-dimensional optimization problem. In this study, we propose a two-stage planning method that integrates network partitioning, source-load centroid identification, and bilevel optimization modeling to determine optimal ER deployment locations and configurations.

Methods The proposed planning method was organized into two stages to address the complexity of ER deployment and configuration under high distributed generation (DG) penetration. In the first stage, the distribution network was represented as a weighted graph, in which line weights were established based on electrical betweenness. A Louvain-based community detection algorithm was employed to divide the network into subregions. Within each subregion, the power source and load centroids were identified by relaxing the source-load distribution and calculating a synthetic centroid. The resulting centroid nodes were mapped to actual physical nodes, which served as candidate locations for ER deployment. The required number of ERs was determined based on the number of subregions. In the second stage, a bilevel optimization model was formulated. The upper level determined the number of ports and the interconnection scheme for each ER, with the objective of minimizing the total system cost, including ER investment and operating expenses. Based on the upper-level decisions, the lower level optimized the port capacity configuration and dispatch strategy under uncertainties in wind generation, solar generation, and load demand. A two-stage adjustable robust optimization model was employed to ensure operational feasibility across a range of worst-case disturbance scenarios. The column-and-constraint generation algorithm and duality theory were applied to solve the robust model iteratively, ensuring compu-

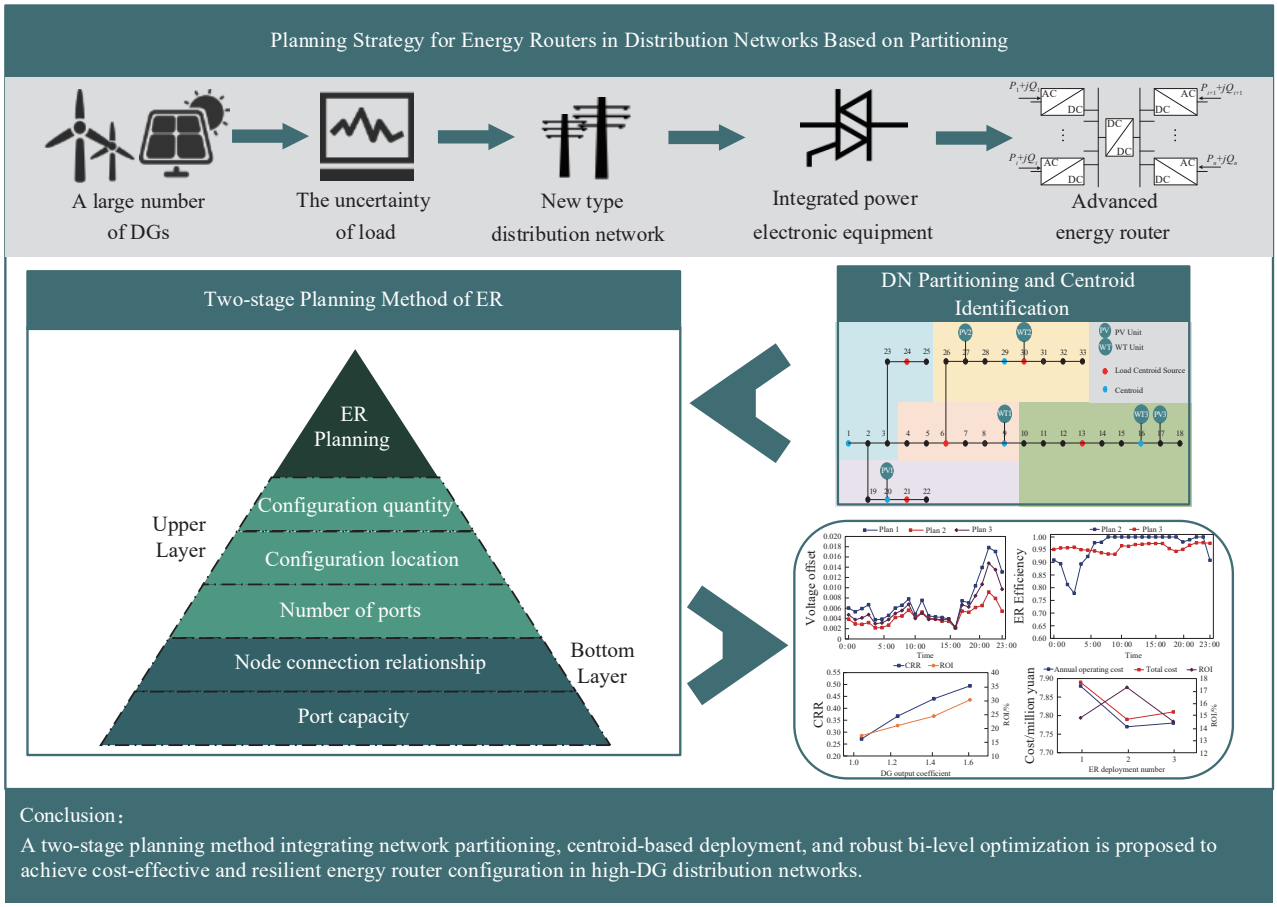
tational tractability and the robustness of the planning solution.

Results and Discussions Case studies conducted on a modified IEEE-33 bus system demonstrated the effectiveness of the proposed method. Compared to the baseline case without ER deployment, the proposed method reduced the annual system cost by 27.14% and improved the ER return on investment (ROI) by 81.9% relative to existing single-ER strategies. The proposed ER planning approach also achieved 100% DG utilization and significantly reduced voltage deviations, with the maximum voltage offset decreasing by 48.73% compared to the baseline. The ERs operated at nearly full capacity during peak hours, achieved an average operational efficiency of 96.1%, and maintained full-load operation for extended periods. Sensitivity analyses indicated that the deployment of two ERs provided an optimal balance between cost and ROI and outperformed underdeployment and overdeployment scenarios. Reducing the unit port capacity, for example, to 10 kVA, improved voltage regulation and increased port utilization through greater configuration flexibility. Across different DG penetration levels, ranging from 1.0 to 1.6, the ER layout remained largely unchanged. Higher penetration levels resulted in greater cost reductions and higher ROI, with the maximum ROI recorded under the 1.6 scenario. Although higher port capacities introduced some redundancy during periods of low output, the overall efficiency remained above 92%, which demonstrated robust adaptability to variations in DG output.

Conclusions The proposed two-stage ER planning method effectively addresses the challenges associated with high DG penetration in radial distribution networks. This method improves economic efficiency, renewable energy accommodation, and voltage stability by integrating network partitioning, gravity center-based deployment, and robust bilevel optimization. Simulation results confirm its adaptability, cost-effectiveness, and scalability under diverse operating conditions, making it a practical solution for next-generation distribution network planning.

Key words: energy router; distribution network; two-stage planning; distributed generation; complex network theory; configuration strategy

Graphical abstract:



（编辑　陈　雪）

引用格式: Fan Ziyuan,Yu Xueying,Li Huaqiang,et al.Planning strategy for energy routers in distribution networks based on partitioning[J].Advanced Engineering Sciences,2026,58(6):205–216.[范梓远,余雪莹,李华强,等.基于区域划分的配电网电能路由器规划策略[J].工程科学与技术,2026,58(6):205–216.]