

考虑节点与网架协同的主动配电网 灵活性资源优化配置方法

张秋实¹, 余雪莹¹, 舒勤¹, 李华强¹, 柏昊阳², 周毅¹, 臧天磊¹

(1. 四川大学电气工程学院, 成都市 610065; 2. 国网四川省电力公司特高压直流中心, 成都市 610041)

摘 要:【目的】随着分布式风电与光伏并网比例增加, 其波动性与间歇性对配电网灵活性提出更高要求。若配电网灵活性不足, 将导致弃风弃光、潮流越限等问题。利用节点消纳能力和网架传输能力的可调性, 是提高灵活性较为高效的方法。提出一种主动配电网节点-网架灵活性资源耦合配置方法。【方法】首先, 建立节点和网架层面的灵活性资源模型, 精确表征节点灵活承载能力与网架传输能力; 其次, 构建灵活性需求模型及评估指标体系, 量化灵活性供给能力; 然后, 以智能软开关 (soft open point, SOP)、混合储能 (hybrid energy storage, HESS)、需求响应 (demand response, DR) 与网架重构为灵活性资源, 提出优化配置方法, 并构建考虑时序相关性的场景以描述配电网运行场景不确定性; 最后, 通过大 M 法与二阶锥松弛将模型转化为混合整数二阶锥模型求解。【结果】算例结果表明, 相较于传统不确定处理方法, 所提考虑时序相关性的场景构建更加符合配电网实际; 所提耦合配置方法虽然增加了部分年投资成本, 但年综合费用降低了 9.67%, 并且保证了配电网的灵活性供需平衡, 减缓了网架的潮流波动。【结论】所提主动配电网节点-网架灵活性资源耦合配置方法充分利用多种灵活性资源的协同优势, 不仅有效提升了配电网的灵活性, 还缓解了网架的阻塞情况, 为高比例分布式风光接入配电网的规划提供参考。

关键词: 节点灵活承载能力; 网架传输能力; 节点-网架灵活性资源; 耦合配置; 时序相关性; 主动配电网

中图分类号: TM72

文献标志码: A

文章编号: 1000-7229(2026)06-0082-16

DOI: 10.12204/j.issn.1000-7229.2026.06.007

Optimal Allocation Method for Flexibility Resources in Active Distribution Networks Considering Nodal and Grid Coordination

ZHANG Qiushi¹, YU Xueying¹, SHU Qin¹, LI Huaqiang¹, BAI Haoyang²,
ZHOU Yi¹, ZANG Tianlei¹

(1. College of Electrical Engineering, Sichuan University, Chengdu 610065, China; 2. State Grid Sichuan
Electric Power UHVDC Center, Chengdu 610041, China)

ABSTRACT: [Objective] With the increasing penetration of distributed wind and photovoltaic generation in distribution networks, their inherent variability and intermittency have imposed higher requirements on network flexibility. Inadequate flexibility may lead to issues such as wind and solar power curtailment and power flow violations. Enhancing flexibility by exploiting the adjustable capabilities of nodal hosting and grid transfer capacity is regarded as an effective approach. This paper proposes a coordinated planning method for nodal-grid flexibility resources in active distribution networks. [Methods] First, flexibility resource models at both the nodal and grid levels were developed to accurately represent the nodal hosting capacity and grid transmission capability. Second, a flexibility demand model and a corresponding evaluation index system were constructed to quantify the system's flexibility supply capacity. Then, four types of flexibility resources—soft open points (SOP), hybrid energy storage systems (HESS), demand response (DR), and network reconfiguration—were considered, and an optimization strategy for their coordinated allocation was proposed. To account for operational uncertainties, time-series-correlated scenarios were generated. The resulting optimization problem was formulated as a mixed-integer second-order cone programming model using the big-M method and second-order cone relaxation techniques. [Results] Case studies based on an improved IEEE 33-bus distribution system demonstrated that the proposed time-series-

correlated scenario generation approach more accurately reflects the operational characteristics of distribution networks compared to traditional uncertainty-handling methods. Although the coordinated allocation strategy increased annual investment to some extent, it reduced the total annual cost by 16.9%, ensured a balance between flexibility supply and demand, and mitigated power flow fluctuations in the grid. **[Conclusions]** The proposed method fully leverages the complementary strengths of various flexibility resources, significantly enhancing distribution network flexibility and alleviating grid congestion. This work provides valuable insights and technical support for planning distribution networks with high penetration of distributed wind and solar generation.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 52377115) and Natural Science Foundation of Sichuan Province (No. 2024NSFSC0870).

KEYWORDS: nodal flexible hosting capacity; network transmission capability; node-network flexibility resources; coupled allocation; temporal correlation; active distribution network

0 引言

随着能源变革的进行和新型电力系统的提出,能源清洁化是未来电网的发展方向之一。截至2024年年底,我国可再生能源发电装机容量达到18.89亿kW,其中,风电装机5.21亿kW,太阳能发电装机8.87亿kW^[1]。然而,大量分布式风电与光伏接入配电网后,其自身波动性和间歇性导致弃风弃光、网络潮流越限等问题增加^[2-3],比如,在2020年,中国的弃风弃光量达166亿kWh和52.6亿kWh,平均弃风弃光率分别为3%和2%^[4]。合理配置系统灵活性资源是提高配网灵活性、解决上述问题的有效途径之一。

目前,配电网灵活性的相关研究主要集中在两个方面:一是通过配置灵活性资源^[5-8],应对风光的波动性和间歇性;二是提高配电网灵活应对各种扰动的能力^[9-11]。其中,在灵活性资源优化配置方面,灵活性主要从两方面展开研究:节点灵活承载能力^[12-13]和网架传输能力^[14-15]。节点灵活承载能力表征节点在一定时间范围内调整功率大小的能力,即节点灵活性;网架传输能力表征网架在安全约束条件下可传输最大功率的能力,即网架灵活性。节点灵活性和网架灵活性是决定配电网整体灵活性水平的核心要素。

节点灵活性主要由需求响应和储能提供。文献[16-17]仅考虑需求响应,挖掘负荷灵活性潜力,提升配电网灵活性,应对风光波动。文献[18-19]仅考虑储能,量化其为配电网提供灵活性的能力。文献[20]同时考虑需求响应和储能,将储能电池和柔性负荷结合,提出广义储能模型。文献[21]建立了考虑季节特性的灵活性资源配置模型。随着新型负荷进入配电网,传统储能的单一调控能力难以同时实现短时的功率支撑和长时的电量存储。混合储能同时具备功率型和能量型储能的优势,兼具快速调节与容量支撑能力,在电力系统中逐渐受到关注。文

献[22]提出社区多能系统混合储能容量配置模型,通过蓄电池和储热罐实现功率和能量的支撑。文献[23]综合考虑需求侧响应和混合储能,提升主动配电网的灵活性和经济性。上述研究从配电网的节点出发,实现灵活性的供需平衡,但忽略了网架传输能力,得到的结果缺乏严谨性。

网架灵活性主要通过网架重构或配置网架灵活性资源实现。在网架重构研究中,文献[24]利用网架重构重新分配多能源负荷来提高配电网运行灵活性。文献[25]通过网架重构实现对网架和潮流的管理,提升配电网灵活性。然而,重构过程中面临的电压约束和重构次数的限制,也使得重构存在一定的局限性^[26]。智能软开关(soft open point, SOP)作为全控型电力电子器件,可以实时连续控制所连线路的潮流,并提供无功支撑,已被广泛应用于网架灵活性提升。文献[27]利用智能软开关,提升网架灵活性,提高分布式风光利用率。文献[28-29]基于智能软开关和网架重构的协同优化,解决分布式电源、电动汽车等引起的配电网运行不确定问题。

针对主动配电网节点灵活性供给不足和网架结构不合理、传输困难等问题,综合考虑节点灵活性和网架灵活性是解决上述难题的关键。文献[30]在节点灵活性资源储能和需求响应的基础上,额外考虑网架重构用于提升配电网灵活性。文献[31]通过网架重构实现源侧、网侧、荷侧、储能侧的时空协调,保证配电网对数据中心的灵活可靠供电。文献[32]将需求响应和动态重构用于新能源的消纳。文献[33]考虑SOP和储能的选址定容以及变电站扩容,充分挖掘配电网的灵活性潜力。文献[34]提出将混合储能与智能软开关结合,满足配电网的灵活性需求。但是随着负荷的多元化和新型化,需求响应成为具有重大潜力的灵活性资源,相比混合储能高昂的投资成本,需求响应具备更高的经济性。然而,现有研究尚未针对多种灵活性资源进行协同配置,亦未从系

统结构出发,综合考虑节点和网架提升配电网灵活性。

此外,在灵活性资源配置中应考虑源荷不确定性带来的影响,以保证配置结果的准确性。现阶段对源荷不确定性的处理方法主要包括鲁棒优化和随机优化。文献[35]采用鲁棒模型刻画光伏出力,有效提升了配电网对光伏的承载能力。文献[16]采用分布鲁棒刻画光伏和负荷的预测误差不确定集,精确描述光伏出力。在随机优化研究中,文献[34]采用拉丁超立方抽样生成典型场景,保证样本集合的均匀。然而,以上文献对源荷的时序相关性考虑均不完善,所得结果与实际仍有差距。

因此,针对现有研究的不足,本文提出了一种主动配电网节点-网架灵活性资源耦合配置方法。该方法的创新性如下:1)针对现有灵活性指标未能较好地刻画网架传输能力,构建了节点和网架灵活性的综合评估指标体系,量化配电网节点与网架灵活性供给能力。2)针对传统风光荷不确定性处理中忽略时序相关性的不足,提出了一种考虑时序相关性的场景构建方法,更加精确描述配电网运行场景的不确定性。3)为发挥源网荷储多维协同的整体潜力,将智能软开关、混合储能、需求响应作为灵活性资源,网架重构作为灵活性提升的重要手段,构建了多灵活性资源时空协同模型,提出了一种考虑节点消纳能力和网架传输能力的灵活性资源优化配置方法。

1 节点灵活性资源和网架灵活性资源模型

当节点下所接负荷或风光发生波动时,节点灵活性一方面匹配本地由于风光荷波动产生的灵活性需求,另一方面向其他节点提供富余的灵活性支撑。但是,此时的灵活性功率支撑要求网架具备足够的传输容量。因此,若主动配电网需要实现灵活性供需平衡,需满足以下条件:节点灵活性在满足本地灵活性需求且有富余;配电网网架留有一定的传输容量或可通过重构、配置智能软开关使得节点灵活性资源能有效传输。灵活性供需平衡与传输框架如图1所示。

1.1 节点灵活性资源模型

本文考虑的节点灵活性资源包括混合储能和需求响应。其中,混合储能由超级电容器(super capacitor, SC)和蓄电池(storage battery, SB)组成;需求响应由可平移负荷(shiftable load, SL)表征,通过相应价格的激励,引导用户调整自身用电行为,反映用

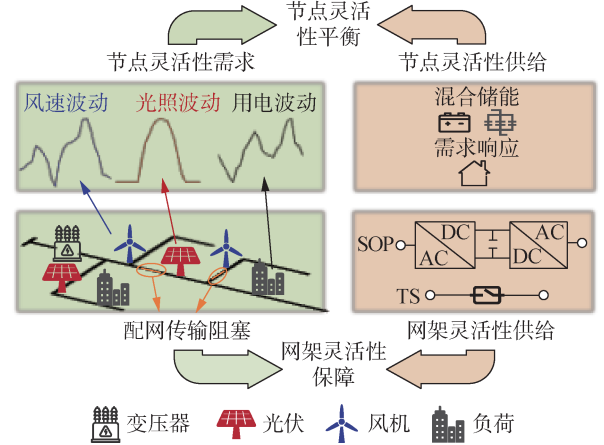


图1 灵活性供需平衡与传输框架

Fig. 1 Flexibility supply-demand balance and transmission block diagram

户侧灵活性调控潜力。

1) 混合储能。

$$p^{\text{hess}} = \mu^{\text{sc, chr}} p^{\text{sc, chr}} \eta^{\text{sc, chr}} + \mu^{\text{sd, chr}} p^{\text{sd, chr}} \eta^{\text{sd, chr}} + \frac{\mu^{\text{sc, dis}} p^{\text{sc, dis}}}{\eta^{\text{sc, dis}}} + \frac{\mu^{\text{sd, dis}} p^{\text{sd, dis}}}{\eta^{\text{sd, dis}}} \quad (1)$$

$$\begin{cases} \mu^{\text{sc, chr}} p_{\min}^{\text{sc, chr}} + \mu^{\text{sd, chr}} p_{\min}^{\text{sd, chr}} \leq p^{\text{hess, chr}} \\ p^{\text{hess, chr}} \leq \mu^{\text{sc, chr}} p_{\max}^{\text{sc, chr}} + \mu^{\text{sd, chr}} p_{\max}^{\text{sd, chr}} \end{cases} \quad (2)$$

$$\begin{cases} \mu^{\text{sc, dis}} p_{\min}^{\text{sc, dis}} + \mu^{\text{sd, dis}} p_{\min}^{\text{sd, dis}} \leq p^{\text{hess, dis}} \\ p^{\text{hess, dis}} \leq \mu^{\text{sc, dis}} p_{\max}^{\text{sc, dis}} + \mu^{\text{sd, dis}} p_{\max}^{\text{sd, dis}} \end{cases} \quad (3)$$

$$\mu^{\text{sc, chr}} \mu^{\text{sc, dis}} = 0 \quad (4)$$

$$\mu^{\text{sd, chr}} \mu^{\text{sd, dis}} = 0 \quad (5)$$

$$E_{\min} \leq E_t^{\text{hess}} \leq E_{\max} \quad (6)$$

$$E_0^{\text{hess}} = E_T^{\text{hess}} \quad (7)$$

式中: p^{hess} 表示混合储能功率; $p^{\text{sc, chr}}$ 、 $p^{\text{sc, dis}}$ 、 $\eta^{\text{sc, chr}}$ 、 $\eta^{\text{sc, dis}}$ 分别表示超级电容充放电功率和效率; $p^{\text{sd, chr}}$ 、 $p^{\text{sd, dis}}$ 、 $\eta^{\text{sd, chr}}$ 、 $\eta^{\text{sd, dis}}$ 分别表示蓄电池充放电功率和效率; $p^{\text{hess, chr}}$ 、 $p^{\text{hess, dis}}$ 分别表示混合储能的充电功率和放电功率; $\mu^{\text{sc, chr}}$ 、 $\mu^{\text{sc, dis}}$ 、 $\mu^{\text{sd, chr}}$ 、 $\mu^{\text{sd, dis}}$ 分别表示超级电容器和蓄电池充放电状态标志; $p_{\min}^{\text{sc, chr}}$ 、 $p_{\max}^{\text{sc, chr}}$ 、 $p_{\min}^{\text{sd, chr}}$ 、 $p_{\max}^{\text{sd, chr}}$ 、 $p_{\min}^{\text{sc, dis}}$ 、 $p_{\max}^{\text{sc, dis}}$ 、 $p_{\min}^{\text{sd, dis}}$ 、 $p_{\max}^{\text{sd, dis}}$ 表示超级电容器和蓄电池充放电功率的上下限; E_t^{hess} 表示 t 时刻混合储能所储的能量; $E_{\max}$ 、 $E_{\min}$ 表示混合储能存储能量的上下限; T 表示时刻总数。

2) 可平移负荷。

$$\sum_{t=1}^T p_{i,t}^{\text{dr, in}} - \sum_{t=1}^T p_{i,t}^{\text{dr, out}} = 0 \quad (8)$$

$$0 \leq p_{i,t}^{\text{dr, out}} \leq \theta_{\max}^{\text{dr}} \chi^{\text{dr}} \quad (9)$$

$$0 \leq p_{i,t}^{\text{dr, in}} \leq \theta_{\max}^{\text{dr}} \chi^{\text{dr}} \quad (10)$$

式中: $\theta_{\max}^{\text{dr}}$ 、 χ^{dr} 、 $p_{i,t}^{\text{dr, out}}$ 、 $p_{i,t}^{\text{dr, in}}$ 分别表示需求响应的最大响应比例、签订容量、 t 时刻移出负荷的功率以及 t 时刻移入负荷的功率。

因此,配电网的节点灵活性供给模型如下所示:

$$f_{\text{up}}^{\text{ess}} = \min \{ \theta_{\text{max}}^{\text{sd}, \text{dis}} p_{\text{max}}^{\text{sd}, \text{cap}} - p_t^{\text{sd}, \text{dis}}, (E_t^{\text{sd}} - E_{\text{min}}^{\text{sd}})/\Delta t \} + \min \{ \theta_{\text{max}}^{\text{sc}, \text{dis}} p_{\text{max}}^{\text{sc}, \text{cap}} - p_t^{\text{sc}, \text{dis}}, (E_t^{\text{sc}} - E_{\text{min}}^{\text{sc}})/\Delta t \} \quad (11)$$

$$f_{\text{dn}}^{\text{ess}} = \min \{ \theta_{\text{max}}^{\text{sd}, \text{chr}} p_{\text{max}}^{\text{sd}, \text{cap}} - p_t^{\text{sd}, \text{chr}}, (E_{\text{max}}^{\text{sd}} - E_t^{\text{sd}})/\Delta t \} + \min \{ \theta_{\text{max}}^{\text{sc}, \text{chr}} p_{\text{max}}^{\text{sc}, \text{cap}} - p_t^{\text{sc}, \text{chr}}, (E_{\text{max}}^{\text{sc}} - E_t^{\text{sc}})/\Delta t \} \quad (12)$$

$$f_{\text{up}}^{\text{dr}} = \theta_{\text{max}}^{\text{dr}} \chi^{\text{dr}} - p_{i,t}^{\text{dr}, \text{out}} \quad (13)$$

$$f_{\text{dn}}^{\text{dr}} = \theta_{\text{max}}^{\text{dr}} \chi^{\text{dr}} - p_{i,t}^{\text{dr}, \text{in}} \quad (14)$$

$$f_{\text{up}}^{\text{s}} = f_{\text{up}}^{\text{ess}} + f_{\text{up}}^{\text{dr}} \quad (15)$$

$$f_{\text{dn}}^{\text{s}} = f_{\text{dn}}^{\text{ess}} + f_{\text{dn}}^{\text{dr}} \quad (16)$$

式中: $f_{\text{up}}^{\text{ess}}, f_{\text{dn}}^{\text{ess}}, f_{\text{up}}^{\text{dr}}, f_{\text{dn}}^{\text{dr}}, f_{\text{up}}^{\text{s}}, f_{\text{dn}}^{\text{s}}$ 分别表示混合储能、需求响应以及主动配电网节点的向上和向下灵活性供给能力; $\theta_{\text{max}}^{\text{sd}, \text{dis}}, \theta_{\text{max}}^{\text{sc}, \text{dis}}, p_{\text{max}}^{\text{sd}, \text{cap}}, p_{\text{max}}^{\text{sc}, \text{cap}}, p_t^{\text{sd}, \text{dis}}, p_t^{\text{sc}, \text{dis}}, E_t^{\text{sd}}, E_t^{\text{sc}}, E_{\text{min}}^{\text{sd}}, E_{\text{min}}^{\text{sc}}$ 分别表示蓄电池和超级电容器的最大允许放电比例、额定功率、 t 时刻放电功率、 t 时刻储存的电量以及最低荷电量。

1.2 网架灵活性资源模型

1) 二阶锥松弛后的SOP模型和约束如下所示:

$$p_i^{\text{sop}} + p_j^{\text{sop}} + p_i^{\text{sop}, \text{loss}} + p_j^{\text{sop}, \text{loss}} = 0 \quad (17)$$

$$Q_{\text{min}, i}^{\text{sop}} \leq Q_i^{\text{sop}} \leq Q_{\text{max}, i}^{\text{sop}} \quad (18)$$

$$Q_{\text{min}, j}^{\text{sop}} \leq Q_j^{\text{sop}} \leq Q_{\text{max}, j}^{\text{sop}} \quad (19)$$

$$\left\| \begin{bmatrix} P_i^{\text{sop}} & Q_i^{\text{sop}} \end{bmatrix}^T \right\|_2 \leq S_i^{\text{sop}} \quad (20)$$

$$\left\| \begin{bmatrix} P_j^{\text{sop}} & Q_j^{\text{sop}} \end{bmatrix}^T \right\|_2 \leq S_j^{\text{sop}} \quad (21)$$

$$\left\| \begin{bmatrix} P_i^{\text{sop}} & Q_i^{\text{sop}} \end{bmatrix}^T \right\|_2 \eta^{\text{sop}, \text{loss}} \leq p_i^{\text{sop}, \text{loss}} \quad (22)$$

$$\left\| \begin{bmatrix} P_j^{\text{sop}} & Q_j^{\text{sop}} \end{bmatrix}^T \right\|_2 \eta^{\text{sop}, \text{loss}} \leq p_j^{\text{sop}, \text{loss}} \quad (23)$$

式中: $p_i^{\text{sop}}, p_j^{\text{sop}}, p_i^{\text{sop}, \text{loss}}, p_j^{\text{sop}, \text{loss}}$ 分别表示 SOP 两端传输的有功功率以及损耗; $Q_{\text{min}, i}^{\text{sop}}, Q_{\text{max}, i}^{\text{sop}}, Q_{\text{min}, j}^{\text{sop}}, Q_{\text{max}, j}^{\text{sop}}$ 分别表示 SOP 两端的无功功率上下限; $S_i^{\text{sop}}, S_j^{\text{sop}}$ 分别表示 SOP 两端的安装容量; $\eta^{\text{sop}, \text{loss}}$ 表示 SOP 的功率损耗系数;

2) 配电网重构约束见附录 A。

2 灵活性需求模型和灵活性评估指标体系

由于可再生能源接入配电网的比例不断升高,为准确刻画因其波动性和间歇性而产生的功率缺额,建立配电网的灵活性需求模型。针对现有研究指标体系中未能较好地刻画网架灵活性的问题,提出节点与网架灵活性综合评估指标体系,量化配电网的灵活性供给能力和网架传输能力。

2.1 灵活性需求模型

主动配电网中净负荷表征为总负荷需求减

去风光出力,再考虑相应的预测误差。因此,灵活性需求主要来源为净负荷波动和相应的误差:

$$p_{i,t,r}^{\text{fc}} = p_{i,t}^{\text{fc}} + \xi_{i,t} \quad (24)$$

$$p_{i,t,r}^{\text{fc}} = p_{i,t,r}^{\text{load}} - p_{i,t,r}^{\text{dg}} \quad (25)$$

$$p_{i,t,r}^{\text{load}} = p_{i,t}^{\text{load}} + \xi_{i,t}^{\text{load}} \quad (26)$$

$$p_{i,t,r}^{\text{dg}} = p_{i,t}^{\text{dg}} + \xi_{i,t}^{\text{dg}} \quad (27)$$

式中: $p_{i,t,r}^{\text{fc}}, p_{i,t,r}^{\text{fc}}, \xi_{i,t}$ 分别为净负荷真实值、预测值和净负荷预测误差; $p_{i,t,r}^{\text{load}}, p_{i,t,r}^{\text{dg}}$ 分别为负荷实际值和风光出力的实际值; $\xi_{i,t}^{\text{load}}, \xi_{i,t}^{\text{dg}}$ 分别为风光荷的预测误差。将净负荷预测误差标准差表征为^[31]:

$$\mu_{i,t} = \sqrt{(\mu_{i,t}^{\text{load}})^2 + (\mu_{i,t}^{\text{dg}})^2} \quad (28)$$

$$\mu_{i,t}^{\text{load}} = 0.02 p_{i,t}^{\text{load}} \quad (29)$$

$$\mu_{i,t}^{\text{dg}} = 0.2 p_{i,t}^{\text{dg}} + 0.02 c^{\text{dg}} \quad (30)$$

式中: $\mu_{i,t}^{\text{load}}, \mu_{i,t}^{\text{dg}}$ 分别为负荷和风光的预测误差标准差; c^{dg} 为风光的装机容量。

利用相邻两个时刻净负荷之差表征灵活性需求:

$$p_{i,t}^{\text{fc}} - \mu_{i,t} \leq p_{i,t,r}^{\text{fc}} \leq p_{i,t}^{\text{fc}} + \mu_{i,t} \quad (31)$$

$$f_{\text{up}}^{\text{d}} = \max(p_{i,t+1}^{\text{fc}} + \mu_{i,t+1} - p_{i,t}^{\text{fc}} + \mu_{i,t}, 0) \quad (32)$$

$$f_{\text{dn}}^{\text{d}} = \max(p_{i,t}^{\text{fc}} + \mu_{i,t} - p_{i,t+1}^{\text{fc}} + \mu_{i,t+1}, 0) \quad (33)$$

式中: $f_{\text{up}}^{\text{d}}, f_{\text{dn}}^{\text{d}}$ 分别为主动配电网的向上和向下灵活性需求。

2.2 灵活性指标体系

从节点灵活性供需情况和网架传输裕度两方面出发,建立衡量评估主动配电网的灵活性指标评估体系。节点灵活性供需情况反映节点灵活性供给能力是否满足由于风光荷不确定性带来的灵活性需求,具体如式(34)所示。

$$f_e = \frac{1}{T} \left[\gamma_1 \sum_{t=1}^T \frac{f_{\text{s}}^{\text{up}} - f_{\text{d}}^{\text{up}}}{f_{\text{max}}^{\text{up}}} + \gamma_2 \sum_{t=1}^T \frac{f_{\text{s}}^{\text{dn}} - f_{\text{d}}^{\text{dn}}}{f_{\text{max}}^{\text{dn}}} \right] \quad (34)$$

式中: $f_{\text{s}}^{\text{up}}, f_{\text{s}}^{\text{dn}}, f_{\text{d}}^{\text{up}}, f_{\text{d}}^{\text{dn}}$ 分别表示主动配电网的灵活性资源能提供的向上、向下灵活性,以及主动配电网的灵活性需求; $f_{\text{max}}^{\text{up}}, f_{\text{max}}^{\text{dn}}$ 分别表示主动配电网允许的向上、向下灵活性限值; γ_1, γ_2 为权重系数。 f_e 表征整个运行周期内节点灵活性供给能力是否能有效满足灵活性需求,若 f_e 大于 0,则表明此时主动配电网中灵活性供给能力足够包络灵活性需求,但 f_e 并不是越大越好, f_e 过大也会造成灵活性资源投资成本的增加,使得主动配电网的经济性欠佳。

网架传输裕度反映主动配电网网架是否具备足

够传输容量来传输节点灵活性的额外功率:

$$f_{t,ij}^n = \frac{p_{ij,t+1} - p_{ij,t}}{p_{\max}} \quad (35)$$

$$f_{nk} = \sqrt{\frac{1}{T} \sum_{t=1}^T (f_{t,ij}^n - \frac{1}{T} \sum_{t=1}^T f_{t,ij}^n)^2} \quad (36)$$

式中: $p_{ij,t+1}$ 、 $p_{ij,t}$ 分别表示支路 ij 在 $t+1$ 和 t 时刻的潮流; $p_{\max}$ 为支路传输功率上限; $f_{t,ij}^n$ 、 f_{nk} 分别表示支路 ij 在相邻时刻潮流变化情况和整个运行周期 T 内总体波动情况。

3 主动配电网节点-网架灵活性资源耦合双层优化配置模型

3.1 双层优化配置模型

本文提出主动配电网节点-网架灵活性资源耦合双层优化配置模型,其中上层为资源配置层,包括对混合储能系统(hybrid energy storage system, HESS)、SL、SOP、静止无功发生器(static var generator, SVG)的位置选取、容量配置及主动配电网的网络重构。下层为运行层,对上层结果进行校验优化,确保灵活性资源传输既能满足网架传输裕度的条件,又能达成节点灵活性的供需平衡,如图2所示。

1) 目标函数。

上层以接入主动配电网的灵活性资源年综合成本最小为目标函数,包括灵活性资源年投资成本和年运行维护费用:

$$C = C_1 + C_2 \quad (37)$$

$$\begin{aligned} C_1 = & \sum_{i \in \psi^{\text{ess,sc}}} \phi^{\text{ess,sc}} (\varepsilon^{\text{ess,sc}} \chi_i^{\text{ess,sc}} + \varepsilon_p^{\text{ess,sc}} \chi_{i,p}^{\text{ess,sc}}) + \\ & \sum_{i \in \psi^{\text{ess,sd}}} \phi^{\text{ess,sd}} (\varepsilon^{\text{ess,sd}} \chi_i^{\text{ess,sd}} + \varepsilon_p^{\text{ess,sd}} \chi_{i,p}^{\text{ess,sd}}) + \\ & \sum_{i \in \psi^{\text{svg}}} \phi^{\text{svg}} \varepsilon^{\text{svg}} \chi_i^{\text{svg}} + \sum_{i \in \psi^{\text{dr}}} \eta^{\text{dr}} \varepsilon^{\text{dr}} \chi_i^{\text{dr}} + \\ & \sum_{i \in \psi^{\text{sop}}} \phi^{\text{sop}} \varepsilon^{\text{sop}} \chi_i^{\text{sop}} \end{aligned} \quad (38)$$

$$\begin{aligned} C_2 = & D \sum_{t=1}^T \sum_{s \in \psi^s} D_s [\sum_{i \in \psi^{\text{dg}}} (\pi^{\text{dg}} p_{i,t,s}^{\text{dg}} + \pi^{\text{dg,cur}} p_{i,t,s}^{\text{dg,cur}}) + \\ & \sum_{i \in \psi^{\text{sc}}} (\pi^{\text{sc}} \chi_i^{\text{ess,sc}} + \pi^{\text{sc,loss}} p_{i,t,s}^{\text{sc,loss}}) + \\ & \sum_{i \in \psi^{\text{sd}}} (\pi^{\text{sd}} \chi_i^{\text{ess,sd}} + \pi^{\text{sd,loss}} p_{i,t,s}^{\text{sd,loss}}) + \\ & \sum_{ij \in \gamma_b} \pi^{\text{loss}} p_{ij,t,s}^{\text{loss}} + \sum_{i \in \psi^{\text{sop}}} (\pi^{\text{sop}} \chi_i^{\text{sop}}) + \\ & \sum_{i \in \psi^{\text{dr}}} (\pi^{\text{dr}} p_{i,t,s}^{\text{dr}}) + \sum_{i \in \psi^{\text{sub}}} (\pi^e p_{i,t,s}^e)] + \sum_{ij \in \gamma_b} n^c \pi^c \end{aligned} \quad (39)$$

$$\phi^x = \frac{\alpha(1 + \alpha)^{\beta^x}}{(1 + \alpha)^{\beta^x} - 1} \quad (40)$$

式中: D 为一年运行天数; D_s 为场景 s 的概率; ϕ^x 表示设备的等值年系数; α 为设备的贴现率; β^x 为设备的经济使用年限; $\psi^{\text{ess,sc}}$ 、 $\psi^{\text{ess,sd}}$ 、 ψ^{dr} 、 ψ^{svg} 、 ψ^{sub} 、 ψ^{sop} 分别为 SC、SB、SL、SVG、上级主网的待选节点集合和 SOP 的待选支路集合; $\varepsilon^{\text{ess,sc}}$ 、 $\varepsilon^{\text{ess,sd}}$ 、 ε^{dr} 、 ε^{svg} 、 ε^{sop} 和 $\chi_i^{\text{ess,sc}}$ 、 $\chi_i^{\text{ess,sd}}$ 、 χ_i^{dr} 、 χ_i^{svg} 、 χ_i^{sop} 分别为 SC、SB、SL、SVG 和 SOP 的单位容量建设成本以及待规划容量; $\varepsilon_p^{\text{ess,sc}}$ 、 $\varepsilon_p^{\text{ess,sd}}$ 和 $\chi_{i,p}^{\text{ess,sc}}$ 、 $\chi_{i,p}^{\text{ess,sd}}$ 为 SC、SB 的单位功率建设成本以及待规划量; π^{dg} 、 $\pi^{\text{dg,cur}}$ 、 $p_{i,t,s}^{\text{dg}}$ 、 $p_{i,t,s}^{\text{dg,cur}}$ 分别为光伏和风机的单位发电成本、弃光弃风惩罚成本、节点 i 场景 s 时刻 t 实际发电量和弃光弃风量; π^{sc} 、 π^{sd} 、 $\pi^{\text{sc,loss}}$ 、 $\pi^{\text{sd,loss}}$ 、 $p_{i,t,s}^{\text{sc,loss}}$ 、 $p_{i,t,s}^{\text{sd,loss}}$ 为 SC 和 SB 的单位容量运维成本、单位功率损耗成本、节点 i 场景 s 时刻 t 充放电损耗; π^{sop} 为 SOP 的单位运维成本; π^{dr} 、 $p_{i,t,s}^{\text{dr}}$ 为 SL 的响应成本和节点 i 场景 s 时刻 t 响应量; π^e 、 $p_{i,t,s}^e$ 为向上级主网的购电价格和节点 i 场景 s 时刻 t 购电量; π^{loss} 、 $p_{ij,t,s}^{\text{loss}}$ 为单位网损成本和支路 ij 场景 s 时刻 t 线路损耗量; π^c 表示联络开关或分段开关单位重构成本; n^c 为一年内重构次数; γ_b 为线路集合。

下层以年运维成本最小和所提灵活性指标最优为目标函数,根据专家经验得到权重系数和归一化系数:

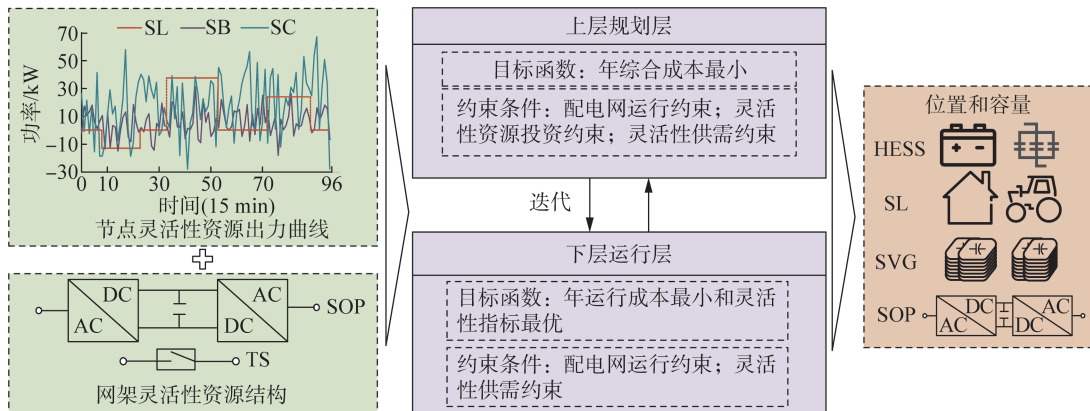


图2 考虑节点和网架双重灵活性规划模型

Fig. 2 Planning model considering dual flexibility of nodes and network structure

$$f = \delta_1 \xi_1 C_2 + \delta_2 \xi_2 f_n \quad (41)$$

式中: δ_1, δ_2 为权重系数; ξ_1, ξ_2 为归一化系数。

2)约束条件。

主动配电网的约束条件包括潮流约束、网架重构约束、混合储能投资运行约束、SOP投资运行约束、需求响应投资运行约束以及灵活性供需平衡约束。灵活性资源的约束见第1.1节,其余约束见附录A。

3)双层模型求解流程。

本文所提模型为大型混合整数规划模型,通过大M法和二阶锥松弛,将所提模型中的非线性部分进行凸松弛,从而可以直接由求解器求解,具体求解流程如图3所示。

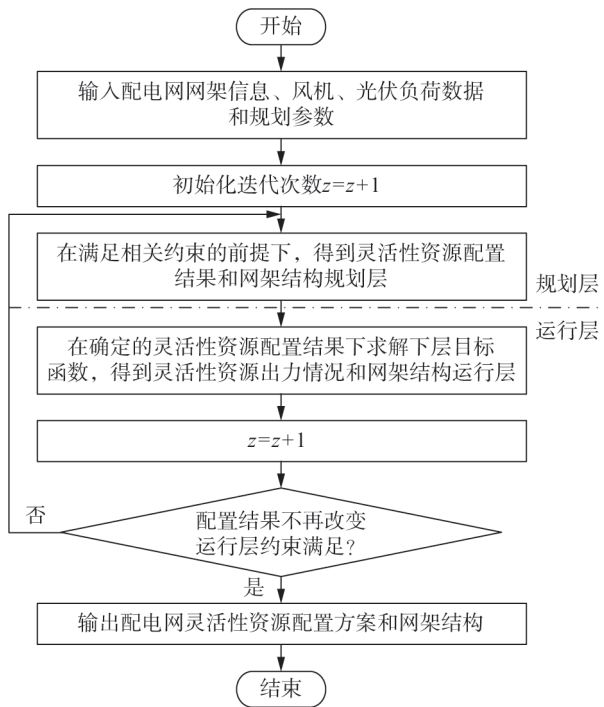


图3 双层模型的求解流程

Fig. 3 Solving flowchart of the bi-level model

模型基于双层优化框架运行:在考虑相关约束条件的前提下,上层规划优化首先求解目标函数,得到灵活性资源配置方案与网架结构,并将结果传递至下层运行优化;下层在固定资源容量与网架结构的条件下,求解分布式风光及各类灵活性资源的出力,并评估配电网运行状态、年运维费用及弃风弃光损失等,同时将运行结果反馈至上层。若部分时段灵活性供需平衡或潮流安全约束无法满足,则上层需增加相应灵活性资源或调整网架结构;若灵活性资源利用率偏低,则削减配置以降低投资成本。通过上述迭代,实现年综合成本与运行灵活性的协同优化,最终获得兼具经济性与灵活性的主动配电网

灵活性资源配置方案。

3.2 风光荷运行场景构建

在对主动配电网的灵活性资源配置之前,应对风光荷的不确定性进行处理。传统多场景构建一般通过抽样产生大量场景集,然后通过聚类进行场景缩减得到典型场景集,但该方法忽略了风光荷的时序相关性。

1)风光荷时序相关性模型。

一般来说,风光出力和负荷用电需求在受到前面时刻影响的同时也会对下一时刻产生影响,即一天之内风光荷的曲线在不同时刻之间存在一定的自相关性。与此同时,同一个配电区域内的风机、光伏组件和负荷用电需求受到相同的气候条件影响,即一天之内风光荷的曲线两两之间存在一定的互相关性。风机出力、光伏出力和负荷需求的时序相关性如图4所示。

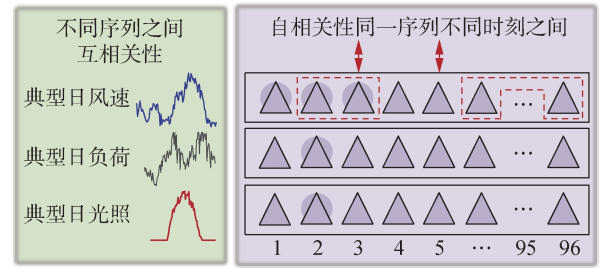


图4 时序相关性示意图

Fig. 4 Schematic diagram of temporal correlation

时序自相关性指风光荷曲线内部不同时刻之间的相关性,体现前面时刻数据对后续不确定性因素影响。对于某一源荷时序 $X = [x_1, x_2, \dots, x_t, \dots, x_T]$, 时刻 t 与后续时刻 $t + \Delta t$ 之间数据的自相关性系数 $\rho_{t, t+\Delta t}^{\text{self}}$ 可以表示为:

$$\rho_{t, t+\Delta t}^{\text{self}} = \frac{\sum_{i=1}^{T-\Delta t} (x_i - \bar{x})(x_{i+\Delta t} - \bar{x})}{\sum_{i=1}^T (x_i - \bar{x})^2} \quad (42)$$

式中: Δt 表示时序时刻间的差值; T 表示时间序列的时刻总数; x_i 表示时刻 t 的数据值; $\bar{x}$ 表示时间序列 X 各时刻数据值的均值。

自相关性系数 $\rho_{t, t+\Delta t}^{\text{self}}$ 表示两时刻间数据的相关性,与时刻前后顺序无关。此外,当 $\Delta t = 0$ 时, $\rho_{t, t+\Delta t}^{\text{self}} = 1$,即各个时刻的数据与自身的自相关性等于1。因此,时间序列 X 的自相关系数矩阵 ρ_x^{self} 可以表示为:

$$\rho_x^{\text{self}} = \begin{bmatrix} 1 & x_{1,2}^{\text{auto}} & \dots & x_{1,t}^{\text{auto}} & \dots & x_{1,T}^{\text{auto}} \end{bmatrix} \quad (43)$$

时序互相关性指风光荷两两数据间的相关性,体现气象对不确定性因素影响。对于两个时间序列 $X = [x_1, x_2, \dots, x_t, \dots, x_T]$, $Y = [y_1, y_2, \dots, y_t, \dots, y_T]$, 两

者间互相关系数 $\rho_{x,y}^{conet}$ 可以表示为:

$$\rho_{x,y}^{conet} = \frac{\sum_{t=1}^T (x_t - \bar{x})(y_t - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{t=1}^T (x_t - \bar{x})^2 \sum_{t=1}^T (y_t - \bar{y})^2}} \quad (44)$$

式中: $\bar{y}$ 表示时间序列 Y 各时刻数据值的均值。

2)不确定性场景构建。

考虑风光荷不同时刻间的自相关特性和两两之间的互相关特性,本文在传统的抽样聚类方法中增加场景重构和场景组合两个步骤。从风光出力和负荷需求的历史时序数据出发,按照“风机、光伏、负荷不确定性模型→考虑时序自相关性的场景生成与重构→考虑时序互相关性的场景缩减与组合”的顺序,构建配电网灵活性资源配置的源、荷联合运行场景集。

上述步骤中,风光和负荷的不确定性概率模型以及笛卡尔乘积原理详见文献[36]。此外,场景重构的原则是:调整随机序列中各时刻列向量中样本的横坐标次序,使得重构后的随机时序矩阵中各行向量(即每一条随机曲线)的自相关系数与 $\rho_x^{self,*}$ 的误差之和 E_x^{self} 尽可能小:

$$E_x^{self} = \sum_{m \in \Omega_x} \|\rho_x^{self,m} - \rho_x^{self,*}\|_2 \leq \varepsilon_1 \quad (45)$$

式中: Ω_x 表示重构后的随机序列集合; $\rho_x^{self,m}$ 、 $\rho_x^{self,*}$ 分别表示重构后的第 m 条随机时序和历史真实场景的自相关系数; ε_1 表示自相关系数允许的最小误差,用于保证重构后序列的基本精度。

场景组合的原则是:组合场景中风光出力随机序列和负荷需求随机序列的互相关性系数与 $\rho_{x,y}^{conet,*}$ 的误差 $E_{x,y}^{conet}$ 尽可能小:

$$E_{x,y}^{conet} = \sum_{n \in \Omega_{x,y}} \|\rho_{x,y}^{conet,n} - \rho_{x,y}^{conet,*}\|_2 \leq \varepsilon_2 \quad (46)$$

式中: $\Omega_{x,y}$ 表示风光和负荷随机序列的组合场景集合; $\rho_{x,y}^{conet,n}$ 、 $\rho_{x,y}^{conet,*}$ 分别表示场景集合中第 n 个组合和历史真实数据的互相关系数; ε_2 表示互相关系数允许的最小误差,用于保证最后筛选出的场景集与历史数据具有较高的匹配度。

4 算例分析

4.1 算例设置与场景构建

本文采用改进的 IEEE 33 节点配电网进行算例分析,如图 5 所示,每条支路都已配置联络开关和分段开关,单次动作成本为 120 元。分布式光伏的接入节点为 12、15、17、25、29、32,分布式风机的接入节点为 3、7、9、16、26、30;混合储能的待选配置节点为 5、10、20、26,需求响应的待选配置节点为 8、19、24;SOP

的待选安装线路为 7—13、9—14、25—56,静止无功发生器的待选配置节点为 3、16。各类灵活性资源的经济使用年限为 15 年,贴现率为 5%。配电网的额定电压为 12.66 kV,基准容量为 10 MV·A,节点电压运行允许偏差为 $\pm 5\%$ 。配电网从上级电网购电电价如附录图 B 所示,为保证用户的正常用电行为,需求响应最大配置容量为 300 kW,网架参数、部分设备规划和运行参数详见文献[37]和[38],其余见附录 B。

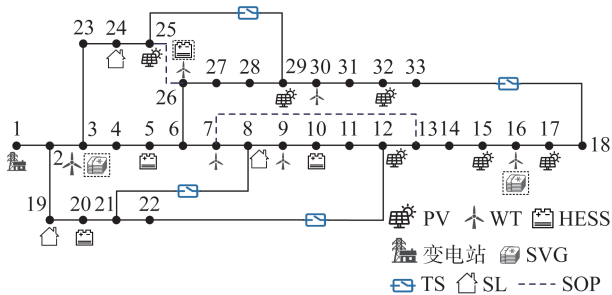


图 5 配电网拓扑图

Fig. 5 Distribution network topology diagram

结合上文分析,首先,将附录图 C1 中风光出力和负荷需求的期望曲线作为不确定性概率模型的抽样均值,运用拉丁超立方抽样分别对风光荷抽样 1000 次,并考虑时序自相关性对风光荷随机序列重构。然后,基于密集距离聚类分别对重构后的风光荷时序缩减,并考虑时序互相关性,对缩减后的光伏和负荷场景进行组合,最终得到四组联合场景,各场景风光荷曲线和概率如附录图 C2、表 C1 所示。

为验证本文所提风光荷场景构建方法的准确性,与传统随机优化方法进行对比分析,如表 1 所示。在考虑时序相关性的因素后,风机、光伏、负荷的自相关性系数误差以及两两之间的互相关性系数误差之和均小于传统抽样方法,由此说明本文方法的优越性。

表 1 场景构建对比结果

Table 1 Comparison results of scenario construction %

场景构建	风机自相关系数误差	光伏自相关系数误差	负荷自相关系数误差	互相关系数误差
随机优化	0.24	0.29	3.01	7.65
本文方法	0.15	0.19	1.76	5.35

4.2 优化配置结果及经济性分析

为验证本文所提方法在提升主动配电网灵活性和经济性的有效性,设置以下三种方案进行对比分析:

方案 1:仅考虑节点灵活性资源即混合储能、需求响应;

方案 2:仅考虑网架灵活性资源即网架重构和智

能软开关;

方案3:同时考虑节点和网架灵活性资源即混合储能、需求响应、智能软开关和网架重构。

3种方案的灵活性资源配置结果和相应投资运行成本如表2所示,括号前面的数字表示规划的节点或线路,括号中的数字表示规划的容量,网架重构方案中的数字代表断开的支路编号,重构结果见附录图B3和B4。需求响应具备较高的经济性,因此,方案1和3的规划结果都将需求响应配置到所允许的最大容量。其次,对于混合储能而言,超级电容和蓄电池分别平抑净负荷中的高频和低频分量,因此,最终的配置功率和配置容量有较大的区别。此外,对于方案2和3智能软开关的配置,在IEEE 33节点的配电网中,节点25和26的有功、无功负荷均较重,智能软开关可以实时传输有功和发出无功,因此,智能软开关配置容量较大。

三种方案下的运行成本如表3所示,表中每项成本均以年为时间尺度,表中的总计为投资成本和各运行成本之和。相比于实时电价,需求响应的调用成本更低,因此,方案1和3的需求响应调用成本基本一致。在风光发电及弃风弃光切负荷成本方面,方案3比方案1降低了74.71%。原因在于方案1仅考虑到节点的灵活性资源,当本地灵活性资源无法平抑风光波动,且网架的传输裕度不足时,会出现风光异地消纳和部分弃风弃光,进而增加运行成本。

对于主网购电成本而言,方案3比方案1、方案2分别降低了5.69%和18.33%。这是由于当方案1的

节点灵活性资源不足以应对风光波动,且网架传输能力受限,无法得到其他节点的灵活性功率支撑,只能向上级主网购买缺额的电量;相比之下,方案2未配置节点灵活性资源,所有功率和电量支撑均依赖上级主网,因此,其购电成本最高。在网损成本方面,方案2、方案3比方案1分别降低了46.06%和56.31%。这主要得益于方案2和方案3均考虑到网架的传输能力和智能软开关的作用,利用智能软开关对有功功率的实时传输,有效地降低网损。总的来说,虽然方案3的配置成本远高于方案二,结合运行成本而言,方案3的综合成本最低,具有更好的经济性。

4.3 灵活性分析

附录图B2为配电网灵活性需求分布图,结合配电网的拓扑结构可以看出,分布式风光接入的节点(如节点7、9、25、30、32)以及重负荷节点(如8、25、26)均呈现出较大的灵活性需求。此外,根据附录C中分布式风光出力曲线可以看出,配电网在09:00、12:30、17:45等时刻有较大的灵活性需求。

图6为主动配电网灵活性整体供需平衡情况,图中的折线分别代表方案1、方案2和方案3可调用的灵活性资源,以及配电网的灵活性需求。方案2和方案3灵活性资源供给能充分满足配电网的灵活性需求,而方案1在某些时刻无法满足配电网的灵活性需求,如12:00和18:00等,在图中为第48和72个时刻点。其原因在于方案1只配置节点灵活性资源,忽视了网架的传输能力,当风光出力或者负荷波动剧烈时,线路潮流变化显著,导致网架传输裕度不足,灵

表2 3个方案配置结果和对应成本
Table 2 Planning results and corresponding costs for three schemes

方案	超级电容(功率/ kW,容量/kWh)	蓄电池(功率/ kW,容量/kWh)	需求 响应/kW	智能软 开关/kVA	网架重 构方案	静止无功 发生器/kvar	投资成本/ 万元
1	10(600,300) 26(450,225)	10(15,200) 26(11.25,150)	8(300) 19(300) 24(300)			3(300) 16(200)	136.16
2				7—13(400) 25—26(800)	7,21 32,36		11.57
3	5(450,225) 20(300,150) 26(450,225)	5(11.25,150) 20(7.5,100) 26(11.25,150)	8(300) 19(300) 24(300)	9—14(200) 25—26(500)	10,25 31,33	2(200)	131.71

表3 3个方案运行成本
Table 3 Operating costs for three schemes

方案	需求响应 调用成本	混合储能 运维成本	风光发电及弃风 弃光切负荷成本	主网购电 成本	智能软开关 运维成本	网损 成本	总计
1	7.02	5.12	30.69	929.29		48.50	1 156.78
2	0	0	7.98	1 076.72	2.60	26.16	1 125.03
3	7.08	6.02	7.74	879.26	1.80	21.19	1 054.80

活性需求大的节点无法得到其他节点或上级主网的功率支撑,从而导致弃风弃光切负荷的情况。该结果与前文提及的方案1弃风弃光切负荷惩罚成本最大的情况相契合,说明了分析的合理性。

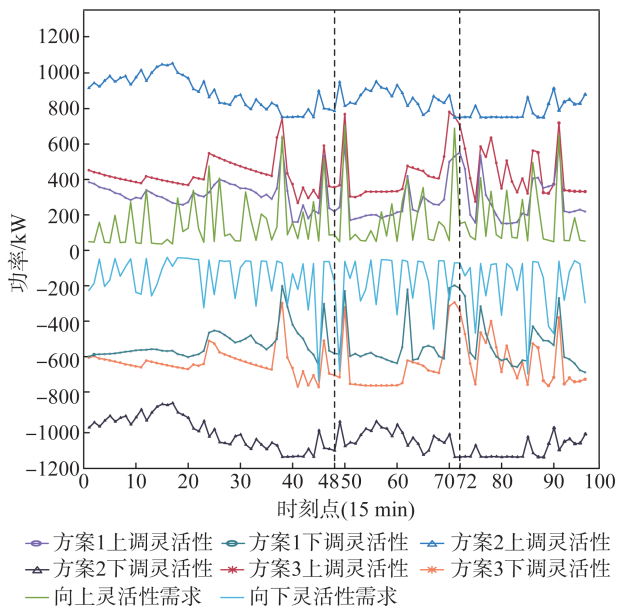


图6 灵活性供需平衡图

Fig. 6 Flexibility supply-demand balance diagram

对于方案2来说,由于只配置网架灵活性资源,其电量和功率支撑全部依赖上级电网,不会轻易出现灵活性供给不足的情况。因此,在图5中代表方案2的折线均在其余折线上方,也正因为方案2的灵活性全部依赖于上级主网,因此其购电成本远远大于方案1和方案3。

结合前文所提供需平衡指标,方案1的灵活性供需平衡指标 f_{e1} 为0.41,方案2的 f_{e2} 为5.52,方案3的 f_{e3} 为0.78。方案2的指标远高于方案1和方案3,主要因其灵活性全部来自上级主网,结合其自身配置的网架灵活性资源,使其具备较高的灵活性冗余。由于方案2的灵活性全部来自上级主网,其运行成本极高。虽然方案1和方案3均配置节点灵活性资源,但方案3的灵活性供需平衡指标比方案1大,说明方案3具有更高的灵活性资源冗余度,能更好地满足配电网的灵活性需求。

图7为运行周期内主动配电网各支路潮流波动情况,图中的点代表前文所提网架传输裕度指标。由图可以看出,三个方案在靠近上级主网的支路上均存在较大的潮流波动。一方面,靠近主网的负荷和风光发生波动时,该节点附近并没有配置灵活性资源,其波动会直接作用于与之相连的线路,造成潮流变化。另一方面,当配置了灵活性资源的节点借助网架向其他未配置灵活性资源的节点提供功率支撑,但该支撑力

度不足时,配电网只有向主网购电来补全功率缺额,但这会进一步加剧靠近主网支路的波动。

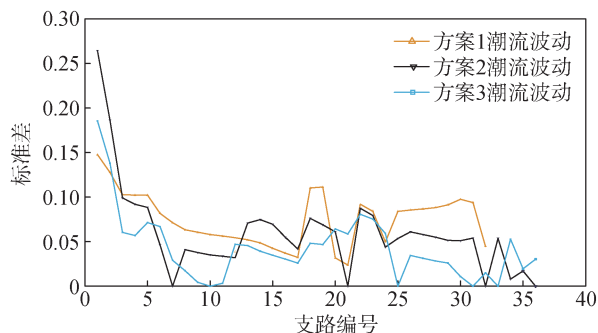


图7 配电网潮流波动情况

Fig. 7 Power flow fluctuations in distribution networks

对于其他支路而言,方案3的波动情况小于方案1和方案2,原因在于:方案3同时配置节点和网架灵活性资源,当没有配置灵活性资源的节点出现灵活性需求时,具有灵活性资源的节点在满足本地灵活性需求后,通过网架灵活性资源向其他节点提供功率支撑,虽然支路潮流会产生波动,但此时的波动均比方案1和方案3小,具有更高的安全运行水平。

以线路8为代表线路进一步分析,图8为三个方案一个运行日内线路8潮流的变化情况。三个方案均出现不同程度的波动,但是方案3波动幅度最小。一方面,由于方案3经过网架重构,8号线路由原来所处配电网中部的的位置调整至靠近末端支路,受其他支路的影响变小,传输的功率下降,从而减小了波动幅度;另一方面,方案3同时配置节点和网架双重灵活性资源,能更好地应对风光和负荷的波动对潮流的影响。

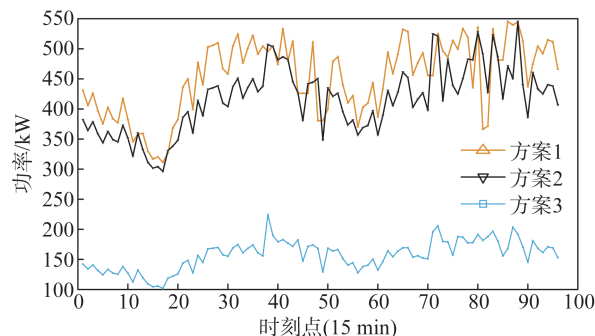


图8 线路8潮流波动情况

Fig. 8 Power flow fluctuations on line 8

以具体时间段为例,在上午09:00—12:00时段,结合附录图C2风光出力曲线和负荷用电曲线,风光和负荷均在波动,且负荷的波动呈现锯齿状,风光出力呈现上升趋势,此时混合储能中的超级电容器处于快速充放电状态,保证对波动带来高频分量的响应能力,蓄电池在这个时段内较长时间处于充电状

态,保证对风光的消纳。在17:30—20:00时段,此时风光发电曲线均呈下降的趋势,而用户用电曲线呈现上升的趋势,此时混合储能中的超级电容和蓄电池均处于放电状态,8号节点通过需求响应将一部分负荷移出,接在线路9—14的智能软开关调节两条线路的潮流,保证对用户供电的同时减缓风光波动对潮流的影响。

为进一步说明阻塞缓解机制,选取节点8作为典型节点进行分析。图9为一个运行日内节点8的灵活性需求情况,结合附录图B2和风光出力曲线可知,节点8在09:00、10:00—12:00、17:00—20:00存在较大的灵活性需求。在09:00和10:00—12:00期间,风光出力逐渐增加、负荷用电呈现锯齿波动,此时节点8主要通过移入负荷为配电网提供下调灵活性。与此同时,节点10的混合储能通过超级电容器的快速充放电来满足高频波动,蓄电池则处于充电状态吸收额外电量。连接在节点9和14的智能软开关通过协调两端线路的功率,转送支路的富余出力到线路13以减轻线路压力。在17:30—20:00期间,光伏出力逐渐降低、风机出力呈现波动状下降、负荷用电逐渐增加,系统的向上灵活性需求增加,容易发生潮流集中和线路阻塞。此时节点8主要通过移出非关键负荷为配电网提供上调灵活性,蓄电池处于放电状态提供额外电量支撑,超级电容器仍处于快速充放电来满足高频波动,智能软开关转送线路14的可用上调能力对节点8提供电量支撑。并且,在网架重构的作用下,结合图7可以看出,节点8所在线路的传输功率和潮流波动幅度得到下降,有效避免了传输阻塞的情况。

4.4 敏感性分析

为验证模型的适用性,本文对分时电价结构、混合储能单位建设成本以及风光不确定性概率模型参

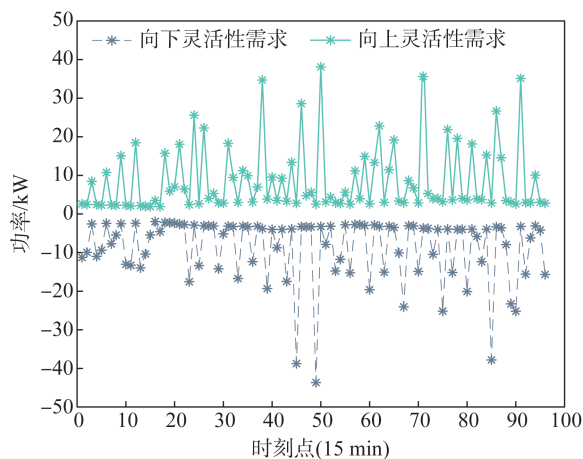


图9 节点8灵活性需求

Fig. 9 Node 8 flexibility demand

数展开敏感性分析。电价方面分别设置3种情景,包括初始分时电价、50%倍初始电价、1.5倍初始电价;混合储能建设成本分别设置3种情景,包括初始成本、80%倍初始成本、1.2倍初始成本;风光不确定性通过调整Beta(α, β)、Weibull(k, c)参数进行分析,设置以下3种场景,场景1(本文场景):(α, β)=(4, 4)、(k, c)=(3, 8),场景2:(α, β)=(2, 2)、(k, c)=(2.00, 8.06),场景3:(α, β)=(8, 8)、(k, c)=(4.00, 7.88)。结果分别如下图10—12所示。

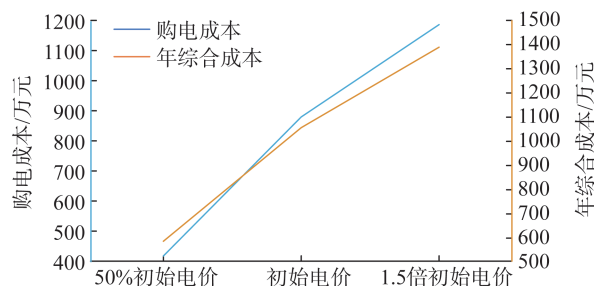


图10 分时电价敏感性分析结果

Fig. 10 Sensitivity analysis results of time-of-use electricity price

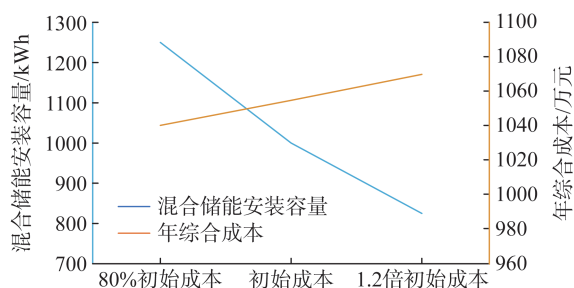


图11 混合储能投资成本敏感性分析结果

Fig. 11 Sensitivity analysis results of hybrid energy storage investment cost

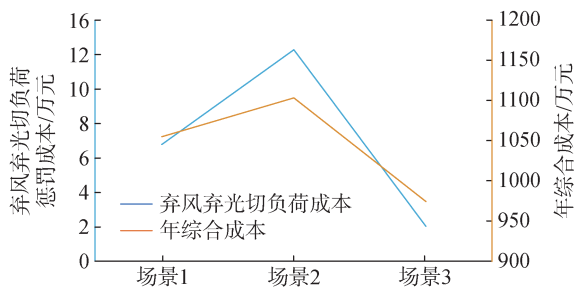


图12 风光不确定性参数敏感性分析结果

Fig. 12 Sensitivity analysis results of wind and solar uncertainty parameters

由图10可以看出:当分时电价为50%倍初始电价时,此时年购电成本为417.65万元,年综合成本为583.21万元,相对变化率为-44.73%;当分时电价为1.5倍初始电价时,此时年购电成本为1186万元,年综合成本为1389.10万元,相对变化率为31.70%。

可以看出本文所提模型的年综合成本与电价变化呈现正相关,具备较好的适应性。进一步分析,当电价上升时,混合储能与需求响应具备更高的经济性,二者的配置容量增加,调用更加频繁,对应成本随之增加。同时,为适应更高的潮流调节需求,智能软开关的配置容量与运维费用也随之增加,但购电成本显著下降。反之,电价下降时,向上级主网购电更具经济性,混合储能、需求响应及智能软开关配置和相关成本均减少,最终使年综合成本大幅下降。

由图 11 可以看出,当混合储能单位投资成本为 80% 倍初始成本时,配置容量由 1000 kWh 增至 1275 kWh,对应年综合成本为 1 040.28 万元,相对变化率为 -1.36%;当单位投资成本为 1.2 倍初始成本时,容量降至 815 kWh,年综合成本为 1 069.82 万元,相对变化率约 1.43%。显然,混合储能单位投资成本与配置容量呈现负相关:单位投资成本下降会促进更大容量的投资与更频繁的调用,而成本上升则会导致配置容量下降。但由于年综合成本中还包括其余灵活性资源的相关费用以及购电成本等,因此混合储能单位成本的变化对年综合成本的影响相对有限。当储能成本上升时,配电网更倾向于通过需求响应和向上级主网购电等手段来提供电量支撑;反之,储能成本降低时则优先扩大储能配置容量来实现电量支撑。

由图 12 可以看出,当风光不确定性加剧即场景 2,弃风弃光切负荷惩罚成本由 7.74 万元升至 14.03 万元,年综合成本增至 1 103.22 万元,相对变化率为 4.60%;而在出力更有利的情形即场景 3,弃风弃光切负荷惩罚成本降至 2.32 万元,年综合成本降至 974.31 万元,相对变化率为 -7.63%。显然,风光不确定性与年综合成本呈正相关:不确定性增强会使得弃风弃光切负荷惩罚成本增加,从而提升年综合成本;不确定性降低则有利于风光消纳并减少相关成本。进一步分析,风光不确定性上升时配电网需增加混合储能、需求响应与智能软开关等灵活性资源的配置容量以满足灵活性需求;当风光不确定性降低且出力偏高时,可相应降低灵活性资源的配置容量并利用风光出力实现电量支撑。

5 结 论

本文针对大量分布式风光接入主动配电网造成灵活性不足和网架传输阻塞的问题,提出一种主动配电网节点-网架灵活性资源耦合配置方法,在改进的 IEEE 33 节点系统验证所提方法的有效性,所得主要结论如下:

1) 提出衡量节点灵活性供需平衡和网架传输裕度的灵活性指标体系,并通过算例验证了所提指标体系既能刻画配电网的整体灵活情况,还能精确描述各时段网架传输和功率波动情况。

2) 针对传统方法处理风光不确定性的不足,本文所提的风光场景构建方法考虑同一序列不同时刻间的自相关性和不同序列间的自相关性,生成的场景集更加符合配电网的实际运行情况。

3) 所提节点-网架灵活性资源耦合双层优化配置模型,同时考虑节点、网架灵活性资源,体现源网荷储多维互动,且计及主动配电网的主动管理能力,有效避免了网架阻塞的情况。算例表明,通过节点与网架的协同配置,风光发电、弃风弃光和切负荷成本降低了 74%,向上级主网的购电成本和网损成本降低了 18.3% 和 56.3%,配电网年综合成本降低了 9.67%,在保证灵活性供需匹配的同时,提高了规划的经济性。

后续研究可进一步探索不同类型灵活性资源的统一表征方法,并引入深度强化学习,以刻画更深层次的节点与网架灵活性耦合关系,从而充分挖掘多维灵活性资源的潜力。本文提出的主动配电网节点-网架灵活性资源耦合配置方法能够为不同地区的主动配电网规划提供参考:对于分布式风光资源富集区域,可有效提升可再生能源消纳水平;对于负荷密集区域,可降低潮流集中和网架阻塞风险。此外,本文研究结论也为新型电力系统建设提供了启示,即在灵活性资源规划过程中,应统筹考虑节点与网架的灵活性供需平衡,以保证最终结果的准确性和科学性。

利益冲突声明 (Conflict of Interests):

所有作者声明不存在利益冲突。

作者贡献声明 (Authors' Contributions):

张秋实构建了配电网灵活性资源双层规划模型,完成了规划模型对比分析,负责论文撰写;余雪莹对论文整体框架进行了梳理,指导并参与论文撰写;舒勤、李华强、柏昊阳、周毅、臧天磊参与了论文写作指导。所有作者均阅读并同意了论文终稿内容。

6 参考文献

- [1] 国家发展改革委,国家能源局. 2024 年可再生能源并网运行情况 [EB/OL]. (2025-01-27) [2025-07-01]. <https://www.nea.gov.cn/20250221/e10f363cabe3458aaf78ba4558970054/c.html>.
- [2] 丁月明,张学清,崔荣喜,等. 计及线性化潮流约束的主动配电网运行优化[J]. 山东电力技术, 2024, 51(3): 36-44.
DING Yueming, ZHANG Xueqing, CUI Rongxi, et al. Operation optimization of active distribution network considering linearized power flow constraints[J]. Shandong Electric Power, 2024, 51(3): 36-44.
- [3] 王宣元,张玮,李长宇,等. 考虑随机性的主动配电网有功无功可行域计算方法[J]. 中国电力, 2025, 58(4): 182-192.
WANG Xuanyuan, ZHANG Wei, LI Changyu, et al. A method for calculating the feasible operation region of active and reactive power in active distribution networks considering stochasticity[J]. Electric

- Power, 2025, 58(4): 182-192.
- [4] 马明滔. 可再生能源电力系统的共享储能容量配置和运行策略研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2023.
- MA Mingtao. Research on sizing and operations of shared energy storage in renewable energy power systems [D]. Nanjing: Nanjing University of Science & Technology, 2023.
- [5] 龚锐, 李华强, 许立雄. 面向配电网综合承载力提升的储能优化配置方法[J]. 电网技术, 2025, 49(9): 3860-3869.
- GONG Rui, LI Huaqiang, XU Lixiong. Optimal allocation method of energy storage systems for improving the comprehensive carrying capacity of distribution network [J]. Power System Technology, 2025, 49(9): 3860-3869.
- [6] 项佳宇, 王方敏, 李冰, 等. 计及灵活性资源传输的配电网灵活性供需协同规划方法[J]. 电力建设, 2025, 46(6): 76-91.
- XU Jiayu, WANG Fangmin, LI Bing, et al. Collaborative planning method for flexibility supply and demand in distribution networks considering flexible resource transmission [J]. Electric Power Construction, 2025, 46(6): 76-91.
- [7] 谭科, 王志承, 刘肇熙, 等. 考虑分布式储能的主动配电网需求侧管理机制与可靠优化方法[J]. 广东电力, 2024, 37(12): 129-137.
- TAN Ke, WANG Zhicheng, LIU Zhaoxi, et al. Demand side management mechanism and robust optimization method for active distribution networks considering distributed energy storage system [J]. Guangdong Electric Power, 2024, 37(12): 129-137.
- [8] 王天宇, 李晓露, 柳劲松, 等. 考虑SOP与智能负载特性的配电网灵活性提升方法[J]. 电力建设, 2024, 45(6): 47-57.
- WANG Tianyu, LI Xiaolu, LIU Jinsong, et al. A method for improving the flexibility of distribution networks considering soft open point and smart load characteristics [J]. Electric Power Construction, 2024, 45(6): 47-57.
- [9] 程其云, 李峰, 罗澍忻, 等. 新型电力系统规划方法框架及关键支撑技术[J]. 电网技术, 2025, 49(6): 2219-2231.
- CHENG Qiyun, LI Feng, LUO Shuxin, et al. Research on the planning methodology framework and key supporting technologies for new power systems [J]. Power System Technology, 2025, 49(6): 2219-2231.
- [10] 娄奇鹤, 李彦斌, 王登政, 等. 现代智慧配电网发展方向与关键技术框架研究[J]. 电力建设, 2025, 46(5): 69-83.
- LOU Qihe, LI Yanbin, WANG Dengzheng, et al. Framework for the development direction and key technologies of modern smart distribution networks [J]. Electric Power Construction, 2025, 46(5): 69-83.
- [11] 王家武, 赵佃云, 刘长锋, 等. 基于目标级联法的多主体主动配电网自治协同优化[J]. 中国电力, 2024, 57(7): 214-226.
- WANG Jiawu, ZHAO Dianyuan, LIU Changfeng, et al. Analytical target cascading based active distribution network level multi-agent autonomous collaborative optimization [J]. Electric Power, 2024, 57(7): 214-226.
- [12] 陈占鹏, 胡炎, 邵能灵, 等. 考虑灵活性与经济性的可再生能源电力系统源网联合规划[J]. 电力自动化设备, 2022, 42(9): 94-101.
- CHEN Zhanpeng, HU Yan, TAI Nengling, et al. Source-grid joint planning of renewable energy power system considering flexibility and economy [J]. Electric Power Automation Equipment, 2022, 42(9): 94-101.
- [13] JI H R, WANG C S, LI P, et al. Quantified analysis method for operational flexibility of active distribution networks with high penetration of distributed generators [J]. Applied Energy, 2019, 239: 706-714.
- [14] 马英浩, 刘琛, 谢开贵, 等. 电力系统网络传输灵活性及其评价综述[J]. 中国电机工程学报, 2023, 43(14): 5429-5440.
- MA Yinghao, LIU Chen, XIE Kaigui, et al. Review on network transmission flexibility of power system and its evaluation [J]. Proceedings of the CSEE, 2023, 43(14): 5429-5440.
- [15] 陈依杭, 李晓露, 柳劲松, 等. 考虑配电网灵活性供需匹配度及网络传输的储能和智能软开关协同规划[J]. 电力建设, 2024, 45(9): 49-62.
- CHEN Yihang, LI Xiaolu, LIU Jinsong, et al. Energy storage system and soft open point coordinated planning considering distribution network flexibility supply-demand matching and network transmission [J]. Electric Power Construction, 2024, 45(9): 49-62.
- [16] 徐维炜, 陈红坤, 汤骏, 等. 计及配电网灵活性的峰谷电价分布鲁棒定价策略[J]. 电力自动化设备, 2024, 44(12): 178-186.
- XU Weiwei, CHEN Hongkun, TANG Jun, et al. Distributionally robust pricing strategy of peak-valley electricity price considering flexibility of distribution network [J]. Electric Power Automation Equipment, 2024, 44(12): 178-186.
- [17] HAAKANA J, HAAPANIEMI J, VILPPO J, et al. Methodology to determine residential heating-based flexibility potential in electricity distribution networks [J]. Sustainable Energy, Grids and Networks, 2023, 33: 100961.
- [18] 宫建锋, 周宗川, 靳盘龙, 等. 考虑灵活性的交直流混合配电网储能双层规划[J]. 电力建设, 2022, 43(7): 48-56.
- GONG Jianfeng, ZHOU Zongchuan, JIN Panlong, et al. Two-level planning of ESS in AC/DC hybrid distribution network considering flexibility [J]. Electric Power Construction, 2022, 43(7): 48-56.
- [19] ALIPOUR M, GHAREHPETIAN G B, AHMADIAHANGAR R, et al. Energy storage facilities impact on flexibility of active distribution networks: stochastic approach [J]. Electric Power Systems Research, 2022, 213: 108645.
- [20] 刘自发, 于普洋, 李颀雨. 计及运行特性的配电网分布式电源与广义储能规划[J]. 电力自动化设备, 2023, 43(3): 72-79.
- LIU Zifa, YU Puyang, LI Jieyu. Planning of distributed generation and generalized energy storage in distribution network considering operation characteristics [J]. Electric Power Automation Equipment, 2023, 43(3): 72-79.
- [21] 程杉, 傅桐, 李沅洋, 等. 含高渗透可再生能源的配电网灵活性供需协同规划[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(22): 1-12.
- CHENG Shan, FU Tong, LI Fengyang, et al. Flexible supply demand collaborative planning for distribution networks with high penetration of renewable energy [J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(22): 1-12.
- [22] SHEN X, LUO Z, XIONG J, et al. Optimal hybrid energy storage system planning of community multi-energy system based on two-stage stochastic programming [J]. IEEE Access, 2021, 9: 61035-61047.
- [23] 刘丽军, 黄伟东, 陈泽楷, 等. 考虑灵活性供需平衡的新型电力系统长短期储能联合规划[J]. 电网技术, 2024, 48(12): 4908-4917.
- LIU Lijun, HUANG Weidong, CHEN Zekai, et al. Joint long-term and short-term energy storage planning for new power system considering supply and demand balance of flexibility [J]. Power System Technology, 2024, 48(12): 4908-4917.
- [24] LI Z M, XU Y, WANG P, et al. Restoration of a multi-energy

- distribution system with joint district network reconfiguration via distributed stochastic programming [J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2024, 15(3): 2667-2680.
- [25] 武忠山, 秦超, 余贻鑫. 考虑网络动态重构的配电系统两阶段灵活性提升优化调度方法[J]. 电网技术, 2020, 44(12): 4644-4653.
- WU Zhongshan, QIN Chao, YU Yixin. Two-stage optimal dispatching method for distribution system flexibility improvement considering dynamic reconfiguration [J]. Power System Technology, 2020, 44(12): 4644-4653.
- [26] 龚逊东, 郭维嘉, 杨晨, 等. 基于动态孤岛的主动配电网多阶段故障恢复策略[J]. 中国电力, 2024, 57(1): 158-166.
- GONG Xundong, GUO Weijia, YANG Chen, et al. Multi-stage fault recovery strategy for active distribution networks based on dynamic islanding[J]. Electric Power, 2024, 57(1): 158-166.
- [27] 王杰, 王维庆, 王海云, 等. 主动配电网中考虑条件风险价值的智能软开关的规划方法[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(2): 1-11.
- WANG Jie, WANG Weiqing, WANG Haiyun, et al. Planning method of soft open point for an active distribution network considering conditional value-at-risk [J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(2): 1-11.
- [28] SU Y, TEH J. Two-stage optimal dispatching of AC/DC hybrid active distribution systems considering network flexibility [J]. Journal of Modern Power Systems and Clean Energy, 2023, 11(1): 52-65.
- [29] 石铖, 安锐, 高红均, 等. 基于柔性多状态开关和动态重构的配电网灵活运行方法[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(22): 133-144.
- SHI Cheng, AN Rui, GAO Hongjun, et al. Flexible operation method for a distribution network based on flexible multi-state switching and dynamic reconfiguration [J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(22): 133-144.
- [30] CRUZ M R M, FITIWI D Z, SANTOS S F, et al. Multi-flexibility option integration to cope with large-scale integration of renewables [J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2020, 11(1): 48-60.
- [31] JIAN J, ZHAO J L, JI H R, et al. Supply restoration of data centers in flexible distribution networks with spatial-temporal regulation [J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2024, 15(1): 340-354.
- [32] 舒俊霖, 刘俊勇, 高红均, 等. 考虑开关重构与需求响应的配电网分布鲁棒优化运行[J]. 电力建设, 2023, 44(6): 101-111.
- SHU Junlin, LIU Junyong, GAO Hongjun, et al. Distributionally robust optimal operation of distribution network considering switch reconfiguration and demand response [J]. Electric Power Construction, 2023, 44(6): 101-111.
- [33] 张沈习, 王浩宇, 李然, 等. 考虑智能软开关接入的主动配电网扩展规划方法[J]. 中国电机工程学报, 2023, 43(1): 48-60.
- ZHANG Shenxi, WANG Haoyu, LI Ran, et al. Active distribution network expansion planning method considering the integration of soft open point [J]. Proceedings of the CSEE, 2023, 43(1): 48-60.
- [34] 刘方, 陆荣欣, 徐韵, 等. 面向智能混合储能软开关支撑新型配
- 电系统双重灵活性的规划-运行协同方法[J]. 电网技术, 2026, 50(1): 125, 284-293.
- LIU Fang, LU Rongxin, XU Yun, et al. A collaborative planning-operation method for dual flexibility of new distribution system supported by soft open point integrated with hybrid energy storage system [J]. Power System Technology, 2026, 50(1): 125, 284-293.
- [35] 杨志淳, 杨帆, 闵怀东, 等. 考虑需求响应的交直流混合配电网分布式光伏承载能力鲁棒评估方法[J]. 高电压技术, 2024, 50(1): 83-92.
- YANG Zhichun, YANG Fan, MIN Huaidong, et al. Distributed PV hosting capacity robust assessment of AC/DC hybrid distribution network considering demand response [J]. High Voltage Engineering, 2024, 50(1): 83-92.
- [36] 刘帅, 李华强, 武姝凝, 等. 考虑灵活性资源传输精细化建模的配电网优化运行[J]. 电网技术, 2025, 49(5): 2024-2034.
- LIU Shuai, LI Huaqiang, WU Shuning, et al. Optimal operation of distribution network considering refined modeling of flexible resource transmission [J]. Power System Technology, 2025, 49(5): 2024-2034.
- [37] 梅惠. 含光热电站的风光火储联合外送系统优化配置方法研究[D]. 南京: 东南大学, 2022.
- MEI Hui. Research on optimal configuration method of wind photovoltaic-thermal-storage combined transmission system with cspp[D]. Nanjing: Southeast University, 2024.
- [38] 柏昊阳, 李华强, 臧天磊, 等. 柔性网架结构下考虑双边交易的多微网与配网协同规划[J]. 电力系统保护与控制, 2024, 52(6): 51-64.
- BAI Haoyang, LI Huaqiang, ZANG Tianlei, et al. Collaborative planning of multiple microgrids and a distribution network considering bilateral transactions in a flexible network structure [J]. Power System Protection and Control, 2024, 52(6): 51-64.

收稿日期: 2025-07-25 修回日期: 2025-09-04



张秋实

作者简介:

张秋实(2001),男,硕士研究生,主要研究方向为配电网规划与运行, E-mail: zhangqiushi@stu.scu.edu.cn;

余雪莹(1991),女,博士,助理研究员,通信作者,主要研究方向为电力系统风险评估, E-mail: yuxueying@scu.edu.cn;

舒勤(1958),男,博士,教授,博士生导师,主要研究方向为电能质量、电气工程通信与信号处理;

李华强(1965),男,博士,教授,博士生导师,主要研究方向为电力系统安全性与稳定性、电网及微电网规划与运行、综合能源系统规划与运营;

柏昊阳(1999),男,硕士,主要研究方向为配电网规划与运行;

周毅(1994),男,博士,副研究员,主要研究方向为新能源电力系统稳定性分析与控制;

臧天磊(1986),男,博士,副教授,主要研究方向为能源互联网能量管理与优化控制、能源信息物理系统安全分析与主动防护。

(编辑 孙静琳)

附录A

A1 配电网重构约束条件

配电网重构过程中的辐射状约束和连通性约束如下所示:

$$\begin{cases} \sum_{ij \in \gamma_b} \phi_{t,ij} = \gamma_n - \gamma_s \\ \sum_{i \in n(j)} \phi_{t,ij} + \sum_{k \in m(j)} \phi_{t,jk} \geq 1 \end{cases} \quad (A1)$$

式中: γ_b 为配电网所有支路集合; γ_n 为配电网所有节点总数, γ_s 为配电网电源总数; $n(j)$ 为以 j 节点为末端节点的支路首端节点集合; $m(j)$ 为以 j 节点为首端节点的末端节点的集合。第1个式子保证配电网呈辐射状约束、第2个式子保证不存在孤立节点。

A2 配电网运行约束条件

采用基于二阶锥松弛的Disflow配电网最优潮流模型,建立相关运行和安全约束,如下所示:

$$P_j = \sum_{i \in \psi_j^u} (p_{ij} - r_{ij} \tilde{I}_{ij}) - \sum_{i \in \psi_j^d} P_{jk} \quad (A2)$$

$$Q_j = \sum_{i \in \psi_j^u} (Q_{ij} - x_{ij} \tilde{I}_{ij}) - \sum_{i \in \psi_j^d} Q_{jk} \quad (A3)$$

$$\begin{aligned} P_j = & p_{\text{load},j} - p_{\text{sub}} - p_{\text{wt},j} - p_{\text{pv},j} - \\ & p_{\text{sc},j}^{\text{dis}} - p_{\text{sd},j}^{\text{dis}} - p_{\text{dr},j}^{\text{out}} + p_{\text{dr},j}^{\text{in}} + \\ & p_{\text{sc},j}^{\text{chr}} + p_{\text{sd},j}^{\text{chr}} + p_{\text{sop},j} \end{aligned} \quad (A4)$$

$$Q_j = Q_{\text{load},j} - Q_{\text{sub}} - Q_{\text{svg},j} + Q_{\text{sop},j} \quad (A5)$$

$$\tilde{V}_j = \tilde{V}_i - 2(P_{ij}r_{ij} + Q_{ij}x_{ij}) + \tilde{I}_{ij}(r_{ij}^2 + x_{ij}^2) \quad (A6)$$

$$\| [2P_{ij} \ 2Q_{ij} \ \tilde{I}_{ij} - \tilde{V}_i]^T \|_2 \leq \tilde{I}_{ij} + \tilde{V}_i \quad (A7)$$

$$\tilde{V}_{j,\min} \leq \tilde{V}_j \leq \tilde{V}_{j,\max} \quad (A8)$$

$$\tilde{I}_{j,\min} \leq \tilde{I}_j \leq \tilde{I}_{j,\max} \quad (A9)$$

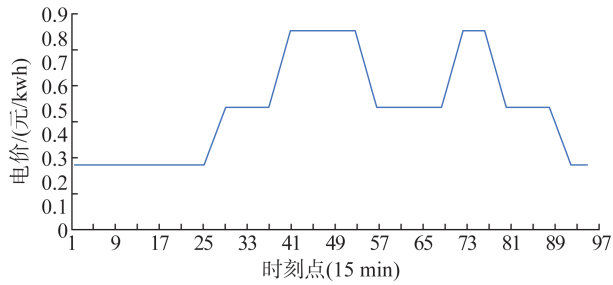
式中: ψ_j^u 、 ψ_j^d 分别表示与节点 j 相连的首端节点和末端节点集合; p_j 、 Q_j 分别表示节点 j 的注入有功、无功功率; $p_{\text{load},j}$ 、 $Q_{\text{load},j}$ 分别表示与节点 j 相连的有功、无功负荷; p_{sub} 、 $p_{\text{wt},j}$ 、 $p_{\text{pv},j}$ 、 $p_{\text{sc},j}^{\text{dis}}$ 、 $p_{\text{sd},j}^{\text{dis}}$ 、 $p_{\text{dr},j}^{\text{out}}$ 、 $p_{\text{dr},j}^{\text{in}}$ 、 $p_{\text{sc},j}^{\text{chr}}$ 、 $p_{\text{sd},j}^{\text{chr}}$ 、 $p_{\text{sop},j}$ 分别表示上级主网出力、风机出力、光伏出力、超级电容器放电、蓄电池放电、可平移负荷响应功率、超级电容器充电、蓄电池充电以及SOP发出的有功; $Q_{\text{svg},j}$ 表示SVG的无功功率; p_{ij} 、 Q_{ij} 表示支路的潮流; r_{ij} 、 x_{ij} 表示支路的电阻电抗; $\tilde{V}_{j,\max}$ 、 $\tilde{V}_{j,\min}$ 、 $\tilde{V}_j$ 分别表示节点电压上下限的平方以及节点电压的平方; $\tilde{I}_{j,\max}$ 、 $\tilde{I}_{j,\min}$ 、 $\tilde{I}_j$ 分别表示支路电流上下限的平方以及支路电流的平方。

$$f_{\text{up}}^d \leq f_{\text{up}}^s \quad (A10)$$

$$f_{\text{dn}}^d \leq f_{\text{dn}}^s \quad (A11)$$

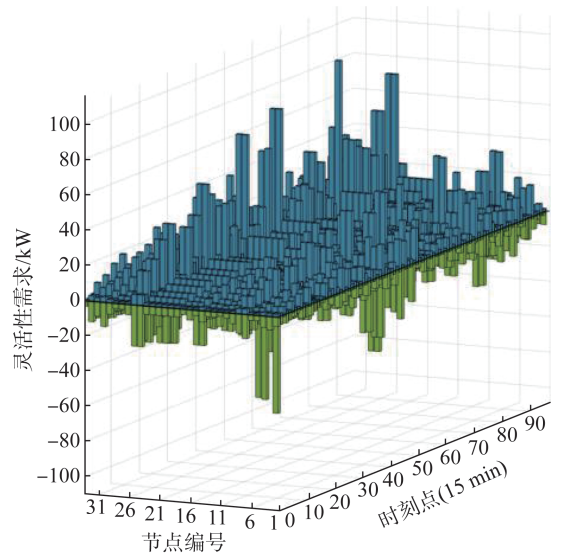
式中: f_{up}^d 、 f_{dn}^d 分别表示向上和向下的灵活性需求; f_{up}^s 、 f_{dn}^s 分别灵活性资源的向上和向下供给。其他灵活性资源的约束见正文灵活性资源模型。

附录B



图B1 实时电价

Fig. B1 Real-time electricity price



图B2 配电网灵活性需求分布

Fig. B2 Flexibility demand of the distribution network

表 B1 设备参数
Table B1 Equipment parameters

设备名称	参数项	数值
超级电容	单位容量建设成本/(元/kW)	10 800
	单位功率建设成本/(元/kWh)	1760
	充放电效率	0.95
	最小最大储电比例	0.1、0.9
	单位运维成本/[元/(kW·h) ²]	0.08
	经济使用年限	15
	贴现率	0.05
蓄电池	单位容量建设成本/(元/kW)	1400
	单位功率建设成本/(元/kWh)	700
	充放电效率	0.9
	最小最大储电比例	0.1、0.9
	单位运维成本/[元/(kW·h) ²]	0.036
	经济使用年限	15
	贴现率	0.05
可平移负荷	最大响应功率比	0.25
	功率因数	0.85
	单位调度成本/(元/kW)	0.6
	单位容量签订成本/(元/kW)	1600
	经济使用年限	15
	贴现率	0.05

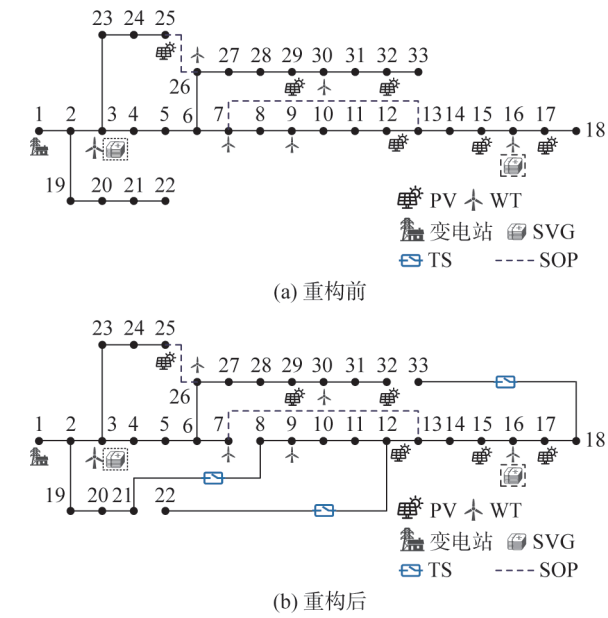


图 B3 方案2重构前后配电网拓扑图
Fig. B3 Topology of the distribution network before and after reconfiguration in case 2

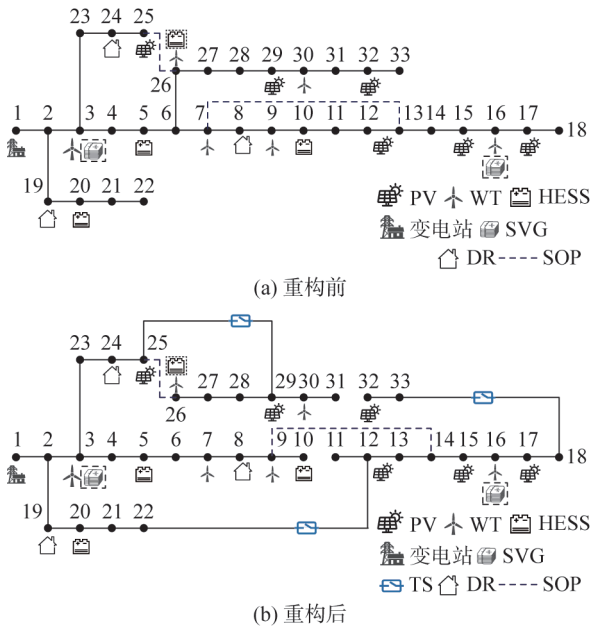


图 B4 方案3重构前后配电网拓扑图
Fig. B4 Topology of the distribution network before and after reconfiguration in case 3

附录 C

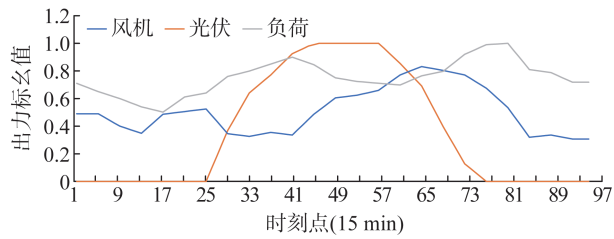


图 C1 风光出力 and 负荷需求期望曲线
Fig. C1 Expected profiles of WT and PV
Output and load demand

表 C1 4 个联合场景出现概率
Table C1 Probabilities of occurrence for the four joint scenarios

场景	概率
场景 1	0.352 8
场景 2	0.259 1
场景 3	0.222 7
场景 4	0.165 4

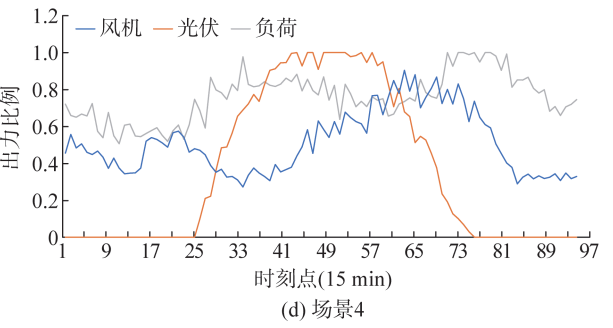
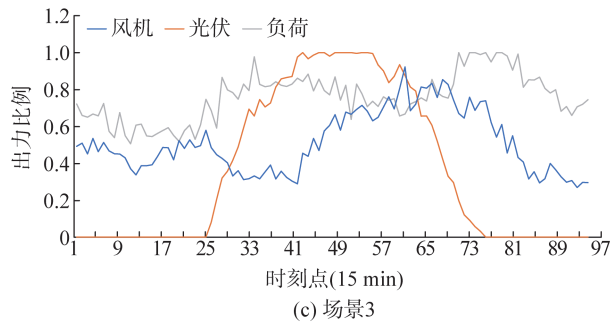
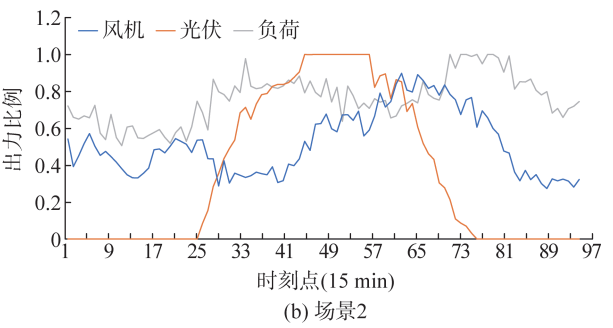
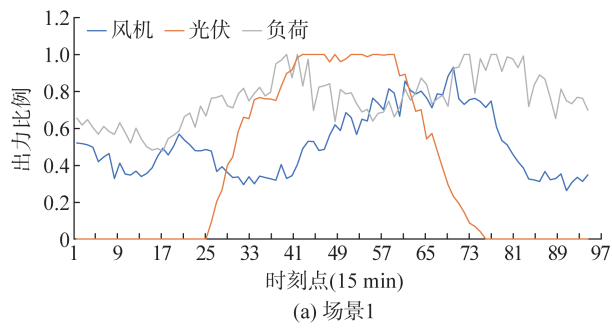


图 C2 4 个联合场景
Fig. C2 Four joint scenarios