

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.230576

含高渗透可再生能源的配电网灵活性供需协同规划

程杉, 傅桐, 李洋洋, 高心杰, 王灿

(电力系统智能运行与安全防御宜昌市重点实验室(三峡大学), 湖北 宜昌 443002)

摘要: 高渗透率可再生能源并网加剧了配电网运行的波动性和不确定性。为提高配电网灵活性和抗干扰能力, 提出了含高渗透率可再生能源的配电网灵活性供需协同规划方法。根据系统运行灵活性供需关系, 定义灵活性评价指标。进而提出配电网灵活性供需协同规划策略, 建立考虑季节特性的配电网灵活性资源双层优化配置模型。上层以投资成本和灵活性不足率最小为目标, 制定灵活性资源配置方案。下层考虑需求侧对季节性电价激励的响应程度进行有功-无功联合优化, 实现对配电网日内多场景时序运行的最优调度。为求解该双层混合整数非线性规划模型, 采用二阶锥松弛对潮流方程进行凸优化, 进而利用 KKT 条件将双层模型转化为单层混合整数二阶锥规划模型进行求解。算例仿真结果表明, 该方法有效提升了配电网运行灵活性和稳定性, 为分布式可再生能源规模化并网等相关工程提供决策参考。

关键词: 高渗透率可再生能源; 配电网; 灵活性指标; 供需协同规划; 有功-无功联合优化

Flexible supply demand collaborative planning for distribution networks with high penetration of renewable energy

CHENG Shan, FU Tong, LI Fengyang, GAO Xinjie, WANG Can

(Yichang Key Laboratory of Intelligent Operation and Security Defense of Power System
(China Three Gorges University), Yichang 443002, China)

Abstract: High penetration renewable energy grid connection has exacerbated the volatility and uncertainty of distribution network operation. To improve the flexibility and anti-interference ability of distribution networks, a flexible supply-demand collaborative planning method for networks containing high penetration of renewable energy is proposed. From the supply-demand relationship of system operation flexibility, flexibility evaluation indicators are defined. A collaborative planning strategy for distribution network flexibility supply and demand is proposed, and a bilevel optimal allocation model for the network flexibility resources considering seasonal characteristics is established. The upper layer formulates a flexible resource allocation scheme with the objective of minimizing investment cost and insufficient flexibility rate. The lower layer takes into account the response of the demand side to seasonal electricity price incentives for active and reactive power joint optimization to achieve the optimal scheduling of multi scenario time series operation of the network during the day. To solve the bilevel mixed integer nonlinear programming model, a second-order cone relaxation is used to convexly optimize the power flow equation, and then the bilevel model is transformed into a single-layer mixed integer second-order cone programming model using the KKT condition. Simulation results show that this method effectively improves the flexibility and stability of distribution network operation, and provides decision-making reference for large-scale grid connection of distributed renewable energy and other related projects.

This work is supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 52107108).

Key words: high penetration renewable energy; distribution grid; flexibility index; supply demand coordination planning; joint active-reactive optimization

0 引言

根据国务院印发《2030 前碳达峰行动方案》,

基金项目: 国家自然科学基金项目资助(52107108); 电力系统智能运行与安全防御宜昌市重点实验研究项目资助(2020DLXY01)

中国正大力推动电力行业深化改革, 清洁无害的可再生能源(renewable energy, RE)正逐步取代传统能源成为新型电力系统主要电源^[1-3]。但是在电源高波动性与负荷不确定性的双重叠加效应下, 配电网缺乏灵活性调节裕度, 导致配电网供需失衡事故频发^[4]。因此研究配电网供需双侧灵活性资源的协同规划策略, 实现对可再生能源高波动性的互补, 具

有一定的工程实际意义^[5-7]。

近年来,配电网灵活性问题得到广泛关注,现有研究主要集中在灵活性资源参与电网的优化调度策略以及容量配置方面。其中,文献[8]考虑源荷不确定性,提出分布式鲁棒优化调度策略来提升配电网灵活性供需平衡能力,但无法实质性解决由高渗透率 RE 波动造成的电力缺额问题。因此文献[9-10]提出适用于电力系统长期规划的灵活性度量方法;在此基础上,大多数学者将灵活性指标通过惩罚成本系数转化为经济指标进行优化配置^[11-12],或如文献[13]将灵活性指标作为约束条件,建立灵活性资源配置模型。但以上方法存在约束指标值选取缺乏合理性,难以对系统灵活性进行针对性优化的缺陷。

可以看出,上述文献主要侧重于单一储能系统的配置,而储能的强时序性限制其灵活性资源长期供应能力,故现阶段还需要着眼于灵活性资源的多元协同规划研究^[14]。文献[15]建立了考虑需求响应与储能协同规划框架,文献[16]从供需双侧展开分析,通过调整分时电价刺激用户参与需求响应,结果均表明所提方法兼顾了配电网运行灵活性与经济性。但是,目前针对配电网灵活性规划的研究仍存在以下局限:一是现有研究多建立基于单一断面数据的双层规划模型,导致规划结果过于保守^[17];二是部分学者从供需双侧研究提升配电网灵活性的规划策略时,缺乏考虑需求侧用户满意度以及高渗透率 RE 的时变性对用户激励电价的影响^[18];三是忽略高渗透率 RE 并网导致无功储备不足而引起电压越限甚至出现脱网故障的问题^[19]。

综上,本文提出含高渗透率 RE 配电网灵活性供需协同规划的方法。首先,考虑负荷和 RE 的时序特性分析配电网灵活性供需关系,建立灵活性资源模型和灵活性评价指标,实现对配电网灵活性定量评估;其次,建立考虑季节特性的配电网灵活性资源双层优化配置模型:规划层以灵活性不足率和规划成本最小为目标建立灵活性资源多目标规划模型;运行层基于季节性动态分时电价建立有功-无功联合优化的多场景时序运行模型。进而,采用二阶锥松弛(second order cone relaxation, SOCR)技术对 Distflow 潮流方程进行凸优化,并利用 KKT 条件将双层模型转化为单层混合整数二阶锥规划(Mixed-integer second-order cone programming, MISOCP)模型进行求解。最后,通过算例对比分析不同规划方案对配电网灵活性和经济性的影响,验证本文所提方法的有效性。

1 配电网灵活性供需特性分析

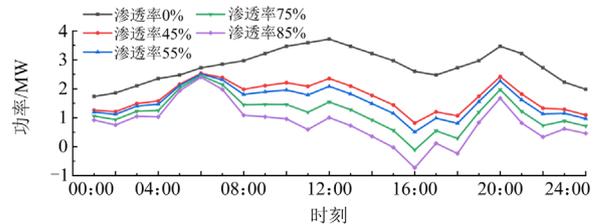
1.1 含高渗透 RE 的配电网灵活性分析

配电网中 RE 的总装机容量与负荷峰值的比率被称为配电网 RE 的渗透率^[20]。在“双碳”目标的推动下,到 2050 年我国 RE 发电占比将达到 62%。高渗透率 RE 并网加剧配电网运行波动性和不确定性。为更好地分析高渗透率 RE 对配电网运行灵活性的影响,本文将配电网灵活性定义为:通过快速调度各类可控资源,应对来自发电以及负荷的不确定扰动的能力。将负荷量与 RE 发电量之差定义为净负荷,可表示为

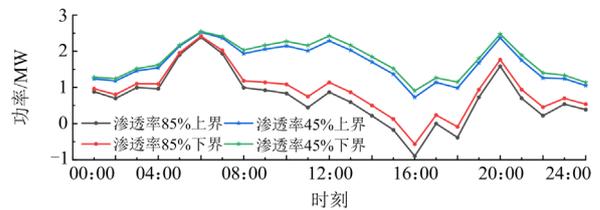
$$P_{NL,s,t} = P_{L,s,t} - P_{RE,s,t} \quad (1)$$

式中, $P_{NL,s,t}$ 、 $P_{L,s,t}$ 和 $P_{RE,s,t}$ 分别为场景 s 下 t 时刻的净负荷、负荷和 RE 出力。

典型日不同 RE 渗透率净负荷曲线如图 1 所示,随着 RE 渗透率的提高,净负荷波动愈加明显。主要体现在:(1) 随 RE 渗透率的提升,净负荷曲线波动率逐步增加,使系统在相同时间内需要更加快速的灵活性响应资源;(2) 高渗透率 RE 并网只是略微降低了负荷波峰,而波谷点却显著下降,导致系统需要较大的向下灵活性裕度,否则将出现大量弃风弃光;(3) 当以 5% 预测误差表征 RE 和负荷不确定性扰动时,高渗透率 RE 的净负荷曲线波动区间以及波动峰谷差更大。



(a) 净负荷曲线



(b) 风光预测误差为5%的净负荷曲线

图 1 不同 RE 渗透率的净负荷曲线

Fig. 1 Net load curve for different RE permeability

综上所述,高渗透率 RE 并网导致配电网灵活性需求急剧上升。因此,有必要对配电网进行灵活性资源优化配置,提高系统处理不确定扰动的能力。

1.1.1 配电网灵活性需求

我国大部分地区地处温带, 受温带季风气候影响, 高渗透率 RE 发电呈显著季节特性。基于单一断面数据的配电网规划结果过于保守。故本文采用马尔科夫链-蒙特卡洛仿真法生成 RE 出力和负荷的全年度时间序列^[21], 以日为单位采用改进的 k-means 聚类方法对原始场景集进行聚类^[22], 选取聚类质心作为典型场景序列, 簇集的幅值区间作为 RE 和负荷的不确定度。并以净负荷在方向和时间尺度上的不确定性变化表征配电网灵活性需求。

如图 2 所示, 显示了净负荷从 t 到 $t+1$ 时刻的变化方向, 其中场景 s 下 t 时刻的净负荷具有上下不确定度 $u_{s,t}$ 、 $d_{s,t}$, 可分别表示为

$$\begin{cases} u_{s,t} = \max(0, P_{NL,s,t}^c - P_{NL,s,t}) \\ d_{s,t} = \max(0, P_{NL,s,t} - P_{NL,s,t}^c) \end{cases} \quad c \in C \quad (2)$$

式中: C 为原始序列聚类后的簇集; $P_{NL,s,t}^c$ 为场景 s 下 t 时刻样本 c 的净负荷。

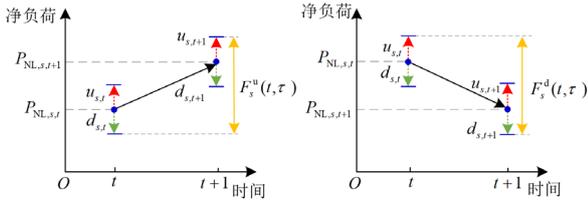


图 2 配电网灵活性需求分析图

Fig. 2 Diagram of distribution network flexibility demand analysis

故配电网灵活性需求可表征为向上、向下灵活性需求, 即

$$\begin{cases} F_s^u(t, \tau) = \max(0, (P_{NL,s,t+\tau} + u_{s,t+\tau}) - (P_{NL,s,t} - d_{s,t})) \\ F_s^d(t, \tau) = \max(0, (P_{NL,s,t} + u_{s,t}) - (P_{NL,s,t+\tau} - d_{s,t+\tau})) \end{cases} \quad (3)$$

式中: $F_s^u(t, \tau)$ 、 $F_s^d(t, \tau)$ 分别为配电网在场景 s 下 t 时刻的向上、向下灵活性需求; τ 为时间尺度, 取 1 h; $u_{s,t+\tau}$ 、 $d_{s,t+\tau}$ 为场景 s 下 $t+\tau$ 时刻的不确定度。

1.1.2 配电网灵活性供给

在能源互联网背景下, 有效利用需求侧灵活性资源, 实现系统供需双侧资源协调互动, 可减少资源配置并提高系统应对长时间不确定性扰动的能力, 本文综合考虑微型燃气轮机(microturbine, MT)、储能(energy storage system, ESS)与电网、用户侧需求响应协同规划提升配电网灵活性。

1) MT 灵活性供应

MT 的灵活性响应能力由爬坡率与额定发电量决定。

$$\begin{cases} F_{MT,s,k}^u(t, \tau) = \min(v_{MT,k}^u \tau, P_{MT,k}^{\max} - P_{MT,s,k,t}) \\ F_{MT,s,k}^d(t, \tau) = \min(v_{MT,k}^d \tau, P_{MT,s,k,t} - P_{MT,k}^{\min}) \end{cases} \quad (4)$$

式中: $F_{MT,s,k}^u(t, \tau)$ 、 $F_{MT,s,k}^d(t, \tau)$ 分别为场景 s 第 k 台 MT 在 t 时刻供应的上、下调灵活性裕度; $v_{MT,k}^u$ 、 $v_{MT,k}^d$ 分别为第 k 台 MT 的向上、向下爬坡率; $P_{MT,k}^{\max}$ 、 $P_{MT,k}^{\min}$ 分别为第 k 台 MT 的最大、最小允许出力; $P_{MT,s,k,t}$ 为场景 s 下第 k 台 MT 在 t 时刻的出力。

2) ESS 灵活性供应

ESS 虽然拥有快速响应能力, 但其灵活性供应能力受 ESS 自身容量与荷电状态的限制。

$$\begin{cases} F_{ESS,s,k}^u(t, \tau) = \min \left(\begin{array}{l} P_{dis,k}^{\max} - P_{dis,s,k,t}, \\ \frac{E_{ESS,k} \eta_{ESS,k} (S_{OC,s,k,t} - S_{OC,k}^{\min})}{\tau} \end{array} \right) \\ F_{ESS,s,k}^d(t, \tau) = \min \left(\begin{array}{l} P_{ch,k}^{\max} - P_{ch,s,k,t}, \\ \frac{E_{ESS,k} (S_{OC,k}^{\max} - S_{OC,s,k,t})}{\tau \eta_{ESS,k}} \end{array} \right) \end{cases} \quad (5)$$

式中: $F_{ESS,s,k}^u(t, \tau)$ 、 $F_{ESS,s,k}^d(t, \tau)$ 分别为场景 s 第 k 组 ESS 在 t 时刻供应的上、下调灵活性裕度; $P_{ch,k}^{\max}$ 、 $P_{dis,k}^{\max}$ 分别为第 k 组 ESS 最大充、放电功率; $P_{ch,s,k,t}$ 、 $P_{dis,s,k,t}$ 分别为场景 s 时刻 t 第 k 组 ESS 充、放电功率; $E_{ESS,k}$ 为第 k 组 ESS 额定容量; $\eta_{ESS,k}$ 为第 k 组 ESS 充放电效率; $S_{OC,s,k,t}$ 为场景 s 第 k 组 ESS 荷电状态; $S_{OC,k}^{\max}$ 、 $S_{OC,k}^{\min}$ 分别为第 k 组 ESS 最大、最小荷电状态。

3) 上级电网灵活性供应

配电网通过变压器与上级电网连接, 因此上级电网提供的灵活性裕度取决于变压器和输电线路的承载能力。即配变关口功率约束为

$$\begin{cases} 0 \leq F_{NET,s}^u(t, \tau) \leq P_{NET,s,t}^{\max} \\ P_{NET,s,t}^{\min} \leq F_{NET,s}^d(t, \tau) \leq 0 \end{cases} \quad (6)$$

式中: $F_{NET,s}^u(t, \tau)$ 、 $F_{NET,s}^d(t, \tau)$ 分别为上级电网提供的向上、向下灵活性裕度; $P_{NET,s,t}^{\max}$ 、 $P_{NET,s,t}^{\min}$ 分别为场景 s 在 t 时刻配变关口最大正、反向允许传输功率。

4) 用户需求响应灵活性供应

用户侧灵活性响应能力取决于用户参与需求响应的意愿程度。本文选取激励型需求响应进行分析, 有

$$\begin{cases} F_{DR,s}^u(t, \tau) = \max(0, P_{DR,s,t}^{\text{traning}}) \\ F_{DR,s}^d(t, \tau) = \max(0, P_{DR,s,t}^{\text{traning}} + P_{DR,s,t}^{\text{cut}}) \end{cases} \quad (7)$$

式中: $F_{DR,s}^u(t, \tau)$ 、 $F_{DR,s}^d(t, \tau)$ 分别为需求响应提供的

向上、向下灵活性裕度； $P_{DR,s,t}^{\text{train}}$ 、 $P_{DR,s,t}^{\text{tranout}}$ 分别为场景 s 在 t 时刻负荷移入、移出量； $P_{DR,s,t}^{\text{cut}}$ 为场景 s 在 t 时刻的切负荷量。

1.2 含高渗透率 RE 配电网灵活性指标

基于上述分析，当灵活性资源提供的灵活性大于系统需求时，配电网拥有抵抗不确定性扰动的能力，否则配电网的抗扰动能力较差。本文引入灵活性不足率作为衡量高渗透 RE 配电网灵活性的评价指标。首先对配电网灵活性不足率进行时间尺度上的统一。

$$\begin{cases} f^u = \sum_s \rho_s \left(\sum_t \mu_{\text{FLEX},s,t} ((F_s^u(t,\tau) - F_{\text{NET},s}^u(t,\tau) - \sum_{k=1}^{K_{\text{MT}}} F_{\text{MT},s,k}^u(t,\tau) - \sum_{k=1}^{K_{\text{ESS}}} F_{\text{ESS},s,k}^u(t,\tau) - F_{\text{DR},s}^u(t,\tau)) / F_s^u) \right) \\ f^d = \sum_s \rho_s \left(\sum_t (1 - \mu_{\text{FLEX},s,t}) (F_s^d(t,\tau) - F_{\text{NET},s}^d(t,\tau) - \sum_{k=1}^{K_{\text{MT}}} F_{\text{MT},s,k}^d(t,\tau) - \sum_{k=1}^{K_{\text{ESS}}} F_{\text{ESS},s,k}^d(t,\tau) - F_{\text{DR},s}^d(t,\tau)) / F_s^d \right) \end{cases} \quad (8)$$

式中： N_s 为场景总数； ρ_s 为场景 s 的概率； $\mu_{\text{FLEX},s,t}$ 为灵活性需求状态变量，向上灵活性需求为 1，向下为 0； f^u 、 f^d 分别为配电网向上、向下灵活性不足率； F_s^u 、 F_s^d 分别为配电网向上、向下灵活性需求总和； T 为总运行时间； K_{MT} 、 K_{ESS} 分别为 MT、ESS 数量。

2 考虑季节特性的配电网灵活性供需协同规划模型

2.1 供需协同规划框架

本文搭建配电网灵活性供需双层协同规划结构，建立区域配电网云端信息平台即配电网运营商 (distribution system operator, DSO)，作为配电网规划决策中心。如图 3 所示，DSO 通过季节性电价激励

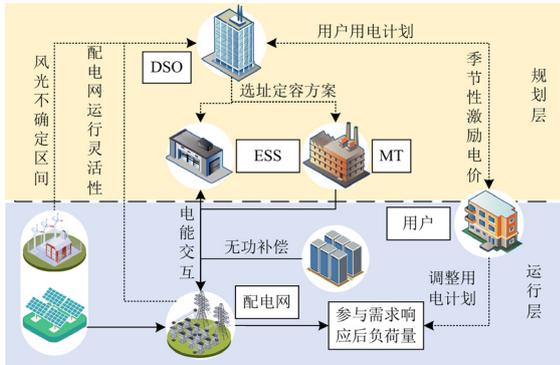


图 3 配电网灵活性供需协同规划框图

Fig. 3 Block diagram of distribution network flexibility supply-demand collaborative planning

策略引导用户调整用电计划，结合配电网实时运行信息，制定灵活性资源的选址定容方案，担任含高渗透率 RE 的配电网保供电、保消纳任务，提升配网运行灵活性和抗干扰能力。

2.2 上层规划模型

2.2.1 目标函数

本文考虑在配置灵活性资源的同时配置无功补偿设备，可降低高渗透率 RE 配电系统的脱网故障率，故构建目标函数 f_1 并做归一化处理，可表示为

$$\min f_1 = (C_{\text{inv,ESS}} + C_{\text{inv,MT}} + C_{\text{inv,Q}}) / C_{\text{inv}}^{\text{max}} \quad (9)$$

式中： $C_{\text{inv,ESS}}$ 、 $C_{\text{inv,MT}}$ 、 $C_{\text{inv,Q}}$ 分别为 ESS、MT、无功补偿设备投资成本； $C_{\text{inv}}^{\text{max}}$ 为最大投资成本。其中：

$$\begin{cases} C_{\text{inv,ESS}} = \frac{\alpha_{\text{ess}}(1 + \alpha_{\text{ess}})^{\beta_{\text{ess}}}}{(1 + \alpha_{\text{ess}})^{\beta_{\text{ess}}} - 1} \sum_{i \in \Omega^{\text{ESS}}} \sum_{k=1}^{K_{\text{ESS}}} (d_{\text{invp,ess}} P_{\text{ESS},i,k} + d_{\text{invs,ess}} E_{\text{ESS},i,k}) \\ C_{\text{inv,MT}} = \frac{\alpha_{\text{mt}}(1 + \alpha_{\text{mt}})^{\beta_{\text{mt}}}}{(1 + \alpha_{\text{mt}})^{\beta_{\text{mt}}} - 1} \sum_{i \in \Omega^{\text{MT}}} \sum_{k=1}^{K_{\text{MT}}} d_{\text{inv,mt}} P_{\text{MT},i,k} \end{cases} \quad (10)$$

式中： α_{ess} 、 α_{mt} 分别为 ESS、MT 年贴现率； β_{ess} 、 β_{mt} 分别为 ESS、MT 使用年限； $d_{\text{invp,ess}}$ 、 $d_{\text{inv,mt}}$ 分别为 ESS、MT 单位功率投资成本； $d_{\text{invs,ess}}$ 为 ESS 单位容量投资成本； $P_{\text{MT},i,k}$ 为节点 i 安装的第 k 台 MT 额定功率； $P_{\text{ESS},i,k}$ 、 $E_{\text{ESS},i,k}$ 分别为节点 i 安装的第 k 组 ESS 充放电功率和容量； Ω^{ESS} 、 Ω^{MT} 分别为 ESS、MT 安装节点集合。

同理，无功补偿设备包括静止无功补偿器 (static var compensator, SVC) 和电容器组 (capacitor bank, CB)，其成本公式参考文献[23]。

引入权重系数 δ 对配电网灵活性不足率进行方向上的统一并构建目标函数 f_2 ，可表示为

$$\begin{cases} \min f_2 = \delta f^u + (1 - \delta) f^d \\ \delta = \frac{F^u}{F^u + F^d} \end{cases} \quad (11)$$

采用优劣解距离法将上层的多目标函数转换为单目标函数 F_1 进行求解，有

$$F_1 = \sqrt{(\varepsilon_1 f_1 - \varepsilon_1 f_{1,\text{end}})^2 + (\varepsilon_2 f_2 - \varepsilon_2 f_{2,\text{end}})^2} \quad (12)$$

式中： $f_{1,\text{end}}$ 、 $f_{2,\text{end}}$ 分别为单目标情况下求得的最优值； ε_1 、 ε_2 为采用层次分析法计算经济性与灵活性目标的权重系数， ε_1 、 ε_2 分别取 0.833、0.167^[24]。

2.2.2 约束条件

1) 灵活性资源装机约束

$$\begin{cases} 0 \leq K_{\text{ESS}} \leq K_{\text{ESS}}^{\text{max}} \\ 0 \leq K_{\text{MT}} \leq K_{\text{MT}}^{\text{max}} \end{cases} \quad (13)$$

式中， $K_{\text{ESS}}^{\text{max}}$ 、 $K_{\text{MT}}^{\text{max}}$ 分别为 ESS、MT 单节点最大安

装数量。

2) 总投资成本约束

$$C_{\text{inv}} \leq C_{\text{inv}}^{\text{max}} \quad (14)$$

2.3 下层运行模型

本文考虑季节性动态激励电价和用户舒适度等影响用户用电计划的因素建立需求响应满意度模型。

2.3.1 季节性动态电价与用户满意度模型

1) 季节性动态激励电价模型

采用半梯形隶属度函数并根据净负荷曲线日内波动情况更新峰谷电价时段划分。

$$\begin{cases} \phi_{s,t} = \frac{P_{\text{NL},s,t} - \min(P_{\text{NL},s})}{\max(P_{\text{NL},s}) - \min(P_{\text{NL},s})} \\ c_{s,t} = c_s^p (1 + \psi) & \phi_{s,t} > \sigma_1 \\ c_{s,t} = c_s^p & \sigma_2 \leq \phi_{s,t} \leq \sigma_1 \\ c_{s,t} = c_s^p (1 - \psi) & \phi_{s,t} < \sigma_2 \end{cases} \quad (15)$$

式中: $\phi_{s,t}$ 为净负荷隶属度; $P_{\text{NL},s}$ 为场景 s 下的净负荷; σ_1 、 σ_2 分别为峰、谷隶属度阈值, σ_1 、 $\sigma_2 \in (0,1)$; $c_{s,t}$ 为动态分时电价; c_s^p 为平时段电价; ψ 为电价浮动比例。

2) 用户满意度模型

(1) 用户负荷调整量

采用模糊理论, 引用 f_3 描述在调度时段内, 用户参与需求响应前后负荷的变化量。

$$f_3 = \sum_{s=1}^{N_s} D_s \sum_{t=\tau}^T (P_{\text{DR},s,t}^{\text{trandin}} + P_{\text{DR},s,t}^{\text{tranout}} + P_{\text{DR},s,t}^{\text{cut}}) \tau \quad (16)$$

式中, D_s 为场景 s 一年内天数。

(2) 需求响应补偿成本 C_{DR}

$$C_{\text{DR}} = \sum_{s=1}^{N_s} D_s \sum_{t=\tau}^T c_{s,t} (P_{\text{DR},s,t}^{\text{tranout}} + P_{\text{DR},s,t}^{\text{cut}}) \tau \quad (17)$$

2.3.2 下层目标函数

下层以年运行成本 C_{run} 和用户满意度为目标, 根据上层提供的灵活性资源配置方案进行有功-无功联合优化调度, 并将最优运行策略返回决策中心。

$$\min F_2 = a_1 C_{\text{run}} + a_2 f_3 + a_3 C_{\text{DR}} \quad (18)$$

式中, a_1 、 a_2 、 a_3 为正加权系数, 采用组合权重法计算得到其分别为 0.6、0.2、0.2。

其中, 年运行成本包括 MT、ESS、RE、SVC、CB 运行成本、网损及购电成本。

$$\begin{cases} C_{\text{MT}} = \sum_{s=1}^{N_s} D_s \sum_{i \in \Omega^{\text{MT}}} \sum_{k=1}^{K_{\text{MT}}} \sum_{t=\tau}^T b P_{\text{MT},s,i,k,t} \tau \\ C_{\text{ESS}} = \sum_{s=1}^{N_s} D_s \sum_{i \in \Omega^{\text{ESS}}} \sum_{k=1}^{K_{\text{ESS}}} \sum_{t=\tau}^T d (P_{\text{dis},s,i,k,t} + P_{\text{ch},s,i,k,t}) \tau \\ C_{\text{RE}} = \sum_{s=1}^{N_s} D_s \sum_{t=\tau}^T e \left(\sum_{k=1}^{K_{\text{PV}}} P_{\text{PV},s,k,t} + \sum_{k=1}^{K_{\text{WT}}} P_{\text{WT},s,k,t} \right) \tau \end{cases} \quad (19)$$

$$\begin{cases} C_{\text{Q}} = \sum_{s=1}^{N_s} D_s \sum_{t=\tau}^T w \left(\sum_{i \in \Omega^{\text{SVC}}} Q_{s,i,t}^{\text{SVC}} + \sum_{i \in \Omega^{\text{CB}}} Q_{s,i,t}^{\text{CB}} \right) \tau \\ C_{\text{LOSS}} = \sum_{s=1}^{N_s} D_s \sum_{ij \in \Omega^{\text{E}}} \sum_{t=\tau}^T g I_{ij,t}^2 r_{ij} \tau \\ C_{\text{NET}} = \sum_{s=1}^{N_s} D_s \sum_{t=\tau}^T h P_{\text{NET},s,t} \tau \end{cases} \quad (20)$$

式中: b 、 d 、 e 、 w 分别表示不同设备的单位运行成本; g 为网损成本; h 为购电电价; $P_{\text{ch},s,i,k,t}$ 、 $P_{\text{dis},s,i,k,t}$ 分别为 t 时刻第 k 组 ESS 充、放电功率; $Q_{s,i,t}^{\text{SVC}}$ 、 $Q_{s,i,t}^{\text{CB}}$ 分别为节点 i 的 SVC、CB 在 s 场景 t 时刻出力; $P_{\text{MT},s,i,k,t}$ 、 $P_{\text{PV},s,k,t}$ 、 $P_{\text{WT},s,k,t}$ 分别为 MT、光伏、风机 k 在 t 时刻出力; $P_{\text{NET},s,t}$ 为 s 场景 t 时刻与电网交互功率; $I_{ij,t}$ 、 r_{ij} 分别为支路电流、电阻; Ω^{SVC} 、 Ω^{CB} 和 Ω^{E} 分别为 SVC、CB 安装节点集合以及支路集合; K_{PV} 、 K_{WT} 分别为光伏、风机的安装数量。

2.3.3 约束条件

1) MT 运行约束

$$\begin{cases} 0 \leq P_{\text{MT},s,k,t} \leq P_{\text{MT},k}^{\text{max}} \\ v_{\text{MT},k}^{\text{d}} \tau \leq P_{\text{MT},s,k,t} - P_{\text{MT},s,k,t-1} \leq v_{\text{MT},k}^{\text{u}} \tau \end{cases} \quad (21)$$

2) RE 运行约束

$$\begin{cases} 0 \leq P_{\text{PV},s,k,t} \leq P_{\text{PV},k,t}^{\text{max}} \\ 0 \leq P_{\text{WT},s,k,t} \leq P_{\text{WT},k,t}^{\text{max}} \end{cases} \quad (22)$$

式中, $P_{\text{PV},k,t}^{\text{max}}$ 、 $P_{\text{WT},k,t}^{\text{max}}$ 分别为 t 时刻光伏、风机最大出力。

3) ESS 运行约束

为延长 ESS 寿命, 防止过充过放, 设置荷电状态约束为

$$\begin{cases} S_{\text{OC},s,k,t} = S_{\text{OC},s,k,t-1} + \frac{(\eta_{\text{ESS},k} P_{\text{ch},s,k,t} - P_{\text{dis},s,k,t} / \eta_{\text{ESS},k}) \tau}{E_{\text{ESS},k}} \\ S_{\text{OC},k}^{\text{min}} \leq S_{\text{OC},s,k,t} \leq S_{\text{OC},k}^{\text{max}} \end{cases} \quad (23)$$

ESS 运行同时也受充电功率上下限约束, 即

$$\begin{cases} \mu_{\text{ch},s,k,t} P_{\text{ch},k}^{\text{min}} \leq P_{\text{ch},s,k,t} \leq \mu_{\text{ch},s,k,t} P_{\text{ch},k}^{\text{max}} \\ \mu_{\text{dis},s,k,t} P_{\text{dis},k}^{\text{min}} \leq P_{\text{dis},s,k,t} \leq \mu_{\text{dis},s,k,t} P_{\text{dis},k}^{\text{max}} \\ \mu_{\text{ch},s,k,t} + \mu_{\text{dis},s,k,t} \leq 1 \end{cases} \quad (24)$$

式中, $\mu_{\text{ch},s,k,t}$ 、 $\mu_{\text{dis},s,k,t}$ 为充放电状态 0-1 变量。

4) 需求响应约束

$$\begin{cases} \sum_{t=\tau}^T (\mu_{\text{dr},s,t} P_{\text{DR},s,t}^{\text{trandin}} - (1 - \mu_{\text{dr},s,t}) P_{\text{DR},s,t}^{\text{tranout}}) = 0 \\ 0 \leq P_{\text{DR},s,t}^{\text{trandin}} \leq P_{\text{DR},s,\text{max}}^{\text{trandin}} \\ 0 \leq P_{\text{DR},s,t}^{\text{tranout}} \leq P_{\text{DR},s,\text{max}}^{\text{tranout}} \\ 0 \leq P_{\text{DR},s,t}^{\text{cut}} \leq P_{\text{DR},s,\text{max}}^{\text{cut}} \end{cases} \quad (25)$$

式中: $\mu_{dr,s,t}$ 为 0-1 状态变量; $P_{DR,s,max}^{train}$ 、 $P_{DR,s,max}^{tranout}$ 、 $P_{DR,s,max}^{cut}$ 分别为 t 时刻负荷最大移入、移出、切负容量。

5) 无功补偿装置约束

(1) SVC 约束

$$Q_{SVC,i}^{\min} \leq Q_{SVC,i}^{SVC} \leq Q_{SVC,i}^{\max}, \forall i \in \Omega^{SVC} \quad (26)$$

式中: $Q_{SVC,i}^{\max}$ 、 $Q_{SVC,i}^{\min}$ 分别为 SVC 出力最大、最小值; Ω^{SVC} 为 SVC 安装节点集合。

(2) CB 约束

为简化计算, 本文考虑各电容器组容量一致, 以投切形式参与配电网调度运行, 表示为

$$Q_{s,i,t}^{CB} = \omega_{s,i,t}^{CB} Q_i^{CB}, \forall i \in \Omega^{CB} \quad (27)$$

$$\xi_{s,i,t}^{CB,IN} + \xi_{s,i,t}^{CB,DE} \leq 1, \forall i \in \Omega^{CB} \quad (28)$$

$$\sum_{t=\tau}^T (\xi_{s,i,t}^{CB,IN} + \xi_{s,i,t}^{CB,DE}) \leq N_i^{CB,max}, \forall i \in \Omega^{CB} \quad (29)$$

$$\begin{cases} \omega_{s,i,t}^{CB} - \omega_{s,i,t-1}^{CB} \geq \xi_{s,i,t}^{CB,IN} - \xi_{s,i,t}^{CB,DE} K_i^{CB,max}, \forall i \in \Omega^{CB} \\ \omega_{s,i,t}^{CB} - \omega_{s,i,t-1}^{CB} \leq \xi_{s,i,t}^{CB,IN} K_i^{CB,max} - \xi_{s,i,t}^{CB,DE}, \forall i \in \Omega^{CB} \end{cases} \quad (30)$$

式中: $\omega_{s,i,t}^{CB}$ 为 CB 运行数量; Q_i^{CB} 为单组 CB 的补偿功率; $\xi_{s,i,t}^{CB,IN}$ 、 $\xi_{s,i,t}^{CB,DE}$ 分别表示 CB 投、切状态, 为 0-1 变量; $N_i^{CB,max}$ 为投切次数上限; $K_i^{CB,max}$ 为节点 i 单次投切 CB 最大组数。

6) 基于 Distflow 潮流约束

$$\begin{cases} \sum_{i \in \Omega^{j,b}} [P_{s,ij,t} - r_{ij} \frac{(P_{s,ij,t})^2 + (Q_{s,ij,t})^2}{(U_{s,i,t})^2}] = \sum_{y \in \Omega^{j,t}} P_{s,jy,t} + P_{s,j,t} \\ \sum_{i \in \Omega^{j,b}} [Q_{s,ij,t} - x_{ij} \frac{(P_{s,ij,t})^2 + (Q_{s,ij,t})^2}{(U_{s,i,t})^2}] = \sum_{y \in \Omega^{j,t}} Q_{s,jy,t} + Q_{s,j,t} \end{cases} \quad (31)$$

$$\begin{cases} P_{s,i,t} + P_{L,s,i,t} = P_{PV,s,i,t} + P_{WT,s,i,t} + P_{dis,s,i,t} - \\ P_{ch,s,i,t} + P_{NET,s,i,t} \end{cases} \quad (32)$$

$$\begin{cases} Q_{s,i,t} + Q_{L,s,i,t} = Q_{NET,s,i,t} + Q_{s,i,t}^{SVC} + Q_{s,i,t}^{CB} \\ (U_{s,i,t})^2 - (U_{s,j,t})^2 = 2(r_{ij} P_{s,ij,t} + x_{ij} Q_{s,ij,t}) - \\ [(r_{ij})^2 + (x_{ij})^2] \frac{(P_{s,ij,t})^2 + (Q_{s,ij,t})^2}{(U_{s,i,t})^2} \end{cases} \quad (33)$$

式中: $U_{s,i,t}$ 、 $U_{s,j,t}$ 分别为场景 s 节点 i 、 j 的电压; $P_{s,ij,t}$ 、 $Q_{s,ij,t}$ 分别为支路 ij 的有功、无功功率; $P_{L,s,i,t}$ 、 $Q_{L,s,i,t}$ 分别为节点 i 负荷有功、无功功率; $\Omega^{j,b}$ 、 $\Omega^{j,t}$ 分别表示末端、首端节点为 j 的支路集合; x_{ij} 为支路 ij 的电抗; $P_{s,j,t}$ 、 $Q_{s,j,t}$ 分别为节点 j 负荷有功、无功功率流出值; $U_{s,i,t}$ 为节点 i 的电压值; $P_{NET,s,i,t}$ 、

$Q_{NET,s,i,t}$ 分别为场景 s 下 t 时刻节点 i 的电网交互有功、无功功率。

7) 安全约束

配电网运行时还需要同时考虑电压越限约束和支路载流量约束。

$$\begin{cases} U_{i,t}^{\min} \leq U_{s,i,t} \leq U_{i,t}^{\max} \\ I_{ij,t}^{\min} \leq I_{s,ij,t} \leq I_{ij,t}^{\max} \end{cases} \quad (34)$$

式中: $U_{i,t}^{\max}$ 、 $U_{i,t}^{\min}$ 分别为节点 i 电压上、下限; $I_{ij,t}^{\max}$ 、 $I_{ij,t}^{\min}$ 分别为支路 ij 电流上、下限; $I_{s,ij,t}$ 为支路 ij 在 s 场景 t 时刻的电流值。

3 模型求解

由于上述灵活性资源双层规划模型是涉及多场景分析的 MINLP 模型, 为提升求解效率并得到最优规划方案, 采用以下方法进行转化。

3.1 基于 KKT 条件的双层规划模型转化

在上述模型中, Distflow 潮流方程为非线性方程, 其非凸形式导致无法使用商业求解器求解。故采用 SOCR 对其作二阶锥松弛, 定义 $W_{s,ij,t}$ 、 $V_{s,i,t}$ 分别为 $(I_{s,ij,t})^2$ 、 $(U_{s,i,t})^2$, 可得^[25]

$$\begin{vmatrix} 2P_{s,ij,t} \\ 2Q_{s,ij,t} \\ W_{s,ij,t} - V_{s,i,t} \end{vmatrix}_2 \leq W_{s,ij,t} + V_{s,i,t} \quad (35)$$

3.2 Distflow 潮流方程的二阶锥等价变形

对 Distflow 潮流的非线性约束进行 SOCP 松弛后, 下层转化为连续凸优化求解问题, 可利用 KKT 条件将拉格朗日乘数法处理等式约束的优化问题推广至不等式, 把下层含目标函数的优化问题转化为无目标函数的方程组求解问题^[25]。

针对下层运行模型, 构造拉格朗日函数 $L(x)$, 即

$$L(x) = F_2(x) + \sum_{l \in \Omega^{QIC}} \lambda_l g_l^{QIC}(x) + \sum_{l \in \Omega^{QEC}} \theta_l g_l^{QEC}(x) \quad (36)$$

式中: $F_2(x)$ 为下层目标函数; $x = [x_1, x_2, \dots, x_n]$ 为决策变量, n 为决策变量数; Ω^{QIC} 、 Ω^{QEC} 分别表示不等式、等式约束集合; g_l^{QIC} 、 g_l^{QEC} 分别为第 l 条不等式、等式约束; λ_l 、 θ_l 为对应拉格朗日乘子。

将下层模型转化为 KKT 条件, 表示为

$$\begin{cases} g_l^{QIC}(x) \leq 0, l \in \Omega^{QIC} \\ g_l^{QEC}(x) = 0, l \in \Omega^{QEC} \end{cases} \quad (37)$$

$$\lambda_l \geq 0, l \in \Omega^{QIC} \quad (38)$$

$$\frac{\partial L(x)}{\partial x} = 0 \quad (39)$$

$$\lambda_l g_l^{\text{QIC}}(x) = 0, l \in \Omega^{\text{QIC}} \quad (40)$$

采用大 M 法对式(39)作进一步线性化处理, 有

$$\begin{cases} \lambda_l \leq M(1 - Y_l) \\ -g_l^{\text{QIC}}(x) \leq MY_l \end{cases}, l \in \Omega^{\text{QIC}} \quad (41)$$

式中: M 表示极大正整数; Y_l 表示 0-1 变量。

至此, 将上述约束条件引入上层规划模型中, 使得灵活性资源双层规划模型转化为单层 MISOCP 模型, 可表示为

$$\begin{cases} \min[F_1(P_{\text{MT},t}, P_{\text{ESS},t}, \dots)] \\ \text{s.t. } g^{\text{QIC}}(P_{\text{MT},t}, P_{\text{ESS},t}, \dots) \leq 0 \\ g^{\text{QEC}}(P_{\text{MT},t}, P_{\text{ESS},t}, \dots) = 0 \end{cases} \quad (42)$$

式中, $g^{\text{QIC}}(P_{\text{MT},t}, P_{\text{ESS},t}, \dots)$ 、 $g^{\text{QEC}}(P_{\text{MT},t}, P_{\text{ESS},t}, \dots)$ 分别为转化后的不等式、等式约束。

4 算例分析

4.1 IEEE33 节点算例系统

本文基于改进的 IEEE33 节点配电系统, 采用基于场景分析的两阶段规划求解策略调用 GUROBI 求解器对上文构建的数学模型进行求解^[26], 验证本文所提方法的有效性。

本文典型季节基础风、光及负荷数据如图 4 所示, 根据负荷分布情况将 33 节点配电系统划分为工业区、商业区和居民区^[24]。为模拟含高渗透率 RE 配电网运行情况, 本文基于配电系统的区域划分, 在 {6, 15, 31} 节点接入容量为 800 kW 的光伏(photovoltaic, PV),

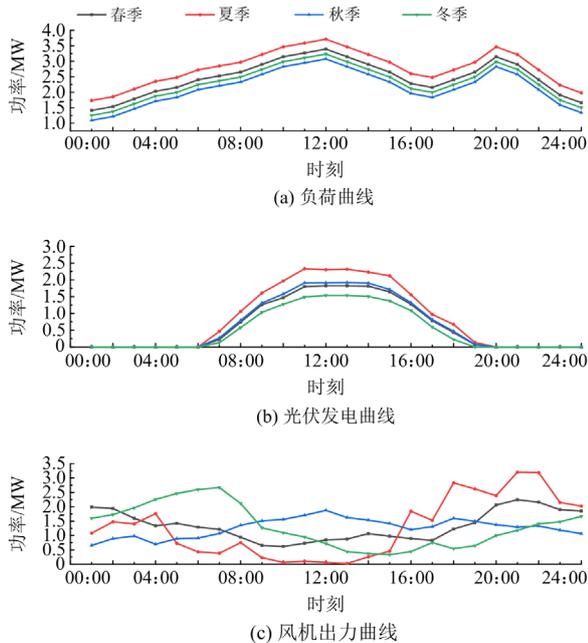


图 4 风、光、负荷出力聚类中心图

Fig. 4 Clustering center diagram of wind, light and load output

在 {21, 23} 节点接入容量为 1.6 MW 的风电, 使 RE 渗透率达 85%。

本文选用容量为 20 kW 的 MT 和容量为 10 kW(40 kWh)的 ESS 电池作为灵活性资源, 参与配电网灵活性提升规划。MT、ESS 的使用年限分别为 20、10 年, 其余参数见表 1。根据无功负荷分布以及 RE 安装位置, 在 {6, 15, 31} 节点安装 SVC, 在 {6, 15} 节点安装容量为 100 kvar 的 CB。并以分时电价作为购电成本和网损成本, 具体参数参考文献^[24]。电压、电流标幺值的取值范围分别为 [0.95, 1.05] p.u.、[0, 3.5] p.u.。

表 1 ESS、MT 参数

Table 1 ESS and MT parameters

参数	取值	参数	取值	参数	取值/(元/kW)
$\eta_{\text{ESS},k}$	0.9	α_{ESS}	0.08	$d_{\text{inv,ESS}}$	10 000
$S_{\text{OC},k}^{\text{min}}$	0.1	$K_{\text{ESS}}^{\text{max}}$	50	$d_{\text{inv,ESS}}$	8000
$S_{\text{OC},k}^{\text{max}}$	0.9	$K_{\text{MT}}^{\text{max}}$	20	$d_{\text{inv,MT}}$	5000
α_{MT}	0.08	—	—	b	0.5

4.2 仿真结果分析

4.2.1 考虑季节特性的多场景时序运行规划结果分析

表 2 为分别采用典型日和本文所提的多场景规划结果。可见, 采用本文所提方法在总成本上有效降低了 17.41%, 灵活性不足率降低了 7.7%。由于规划以年为时间尺度, 对于含高渗透率 RE 的配电网规划采用单一典型日进行运行模拟, 不能很好地表征一年内 RE 及负荷的变化。而考虑 RE 及负荷的季节时序特性进行多场景规划得到的 ESS 配置数量更多且分布更加均匀, 提升了系统对 RE 丰能季的消纳和枯能季的补偿能力。同时避免极端典型日导致规划成本保守的问题, 提升规划结果的经济性。

表 2 不同方案规划结果

Table 2 Planning results of different schemes

	总成本/ 万元	灵活性 不足率/%	MT 配置节点(数量)	ESS 配置节点 (数量)
典型日 规划	471	10	5(18),10(10) 16(5),20(2),28(7)	23(41),31(27)
多场景 规划	389	2.3	5(17),10(6) 16(1),20(6),28(10)	6(27),15(5), 21(3),31(32)

注: 表中“5(18)”的 5 表示安装节点 5, 括号里 18 表示安装数量。

图 5 为本文规划方案在满足正常运行条件下的净负荷允许波动区间。其中, 灵活性资源的配置在春、秋季运行效果最佳, 灵活性裕度足以应对可再生能源的不确定扰动。在净负荷高波动的夏季, 灵活性供给受限于爬坡率以及对经济性考虑的缘故, 存在部分时段灵活性裕度较小, 因此仍存在 2.3%的

灵活性不足率。但相比采用单一断面数据进行配电网灵活性规划,系统整体经济性和应对不确定性干扰的能力得以提升。

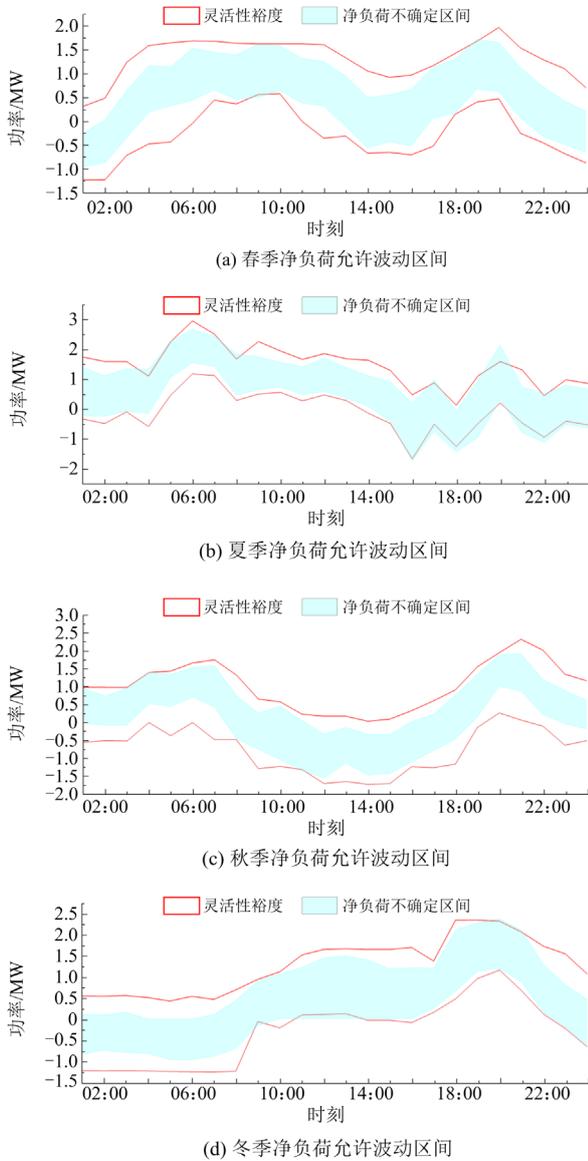


图5 净负荷允许波动区间

Fig. 5 Allowable fluctuation interval of net load

4.2.2 考虑灵活性指标的优势

为验证本文建立的灵活性资源规划模型的有效性以及灵活性指标的优越性,设置以下方案进行仿真对比分析。

- 方案一: MT 规划, 考虑灵活性指标;
- 方案二: ESS 规划, 考虑灵活性指标;
- 方案三: MT、ESS 规划, 不考虑灵活性指标;
- 方案四: MT、ESS 规划, 考虑灵活性指标;
- 方案五: 本文灵活性资源规划策略。

各方案均采用多场景时序规划,其灵活性资源优化配置结果如表3所示,选取最恶劣场景夏季典型日进行分析,运行结果如表4所示。由表4可知,方案一的总花费成本在5个方案中相对较低,但其弃风弃光量达2.04 MW。这是由于对MT的规划可以为系统提供充裕的向上灵活性,但向下灵活性供给能力较差,特别是系统对灵活性呈现负需求时无法提供向下灵活性调节裕度。因此方案一灵活性不足率高达20.65%。

表3 灵活性资源配置方案

Table 3 Flexible resourcing configuration schemes

方案	MT 配置节点(数量)	ESS 配置节点(数量)
一	5(20),10(9),20(11),28(20)	—
二	—	6(80),15(65),21(31), 23(80),31(80)
三	5(20),10(7),20(9),28(14)	23(7),31(17)
四	5(17),10(6),16(1),20(6),28(10)	6(27),15(5),21(3),31(32)
五	5(10),10(5),28(13)	6(20),15(2),21(11),23(20), 31(4)

表4 配电网夏季典型日内运行结果

Table 4 Typical intra-day operation results of distribution network in summer

方案	总成本/万元	弃风弃光/MW	切负荷/MW	灵活性不足率/%
一	423	2.04	0	20.65
二	558	0	5.66	39.8
三	360	1.93	0	9.67
四	389	0.15	0	2.3
五	278	0	2.4	2

方案二只考虑ESS的规划,其运行局限性最大。ESS的强时序关联性影响其灵活性供给能力,当ESS的蓄电量难以满足放电需求时,导致系统需要切除大量负荷(5.66 MW)以满足电力平衡。加之ESS高昂的投资建设成本,使得方案二的总成本最高为558万元。虽然ESS拥有快速的灵活性响应能力,但其调节裕度受限于蓄电量,故系统的灵活性不足率高达39.8%。

方案三则是在不考虑灵活性指标下考虑MT和ESS的协同规划,总成本最低为260万元,相比方案一、二可知,MT和ESS作为灵活性资源的协同规划,能有效提高配电系统的灵活性,灵活性不足率较方案一降低了10.98%,但是缺乏灵活性指标的约束,系统选择舍弃部分风光资源(1.93 MW)以提高整体经济效益。

方案四在方案三的基础上考虑灵活性指标的多目标规划,系统偏向于投资灵活性响应能力更快的ESS,如表3所示。故总成本比方案三高29万元,

但更多的ESS配置提升了配电网在长时间尺度上对RE的消纳能力,可见弃风弃光量降低了92%。其次更加均衡的灵活性资源提升了配电网的灵活性条件裕度,灵活性不足率达到2.3%。

对比方案五和方案四,考虑供需协同规划策略,促使用户根据季节性补偿激励改变用电习惯,实现对负荷曲线的削峰填谷作用。同时提升配电网对需求侧资源的利用率,减少灵活性资源规划冗余,总成本降低了28.5%,灵活性不足率保持在2%,实现灵活性与经济性的兼顾。

为进一步分析各方案配置结果对系统运行灵活性的影响,将净负荷减去灵活性资源输出功率得到纯净净负荷波动曲线,如图6所示。

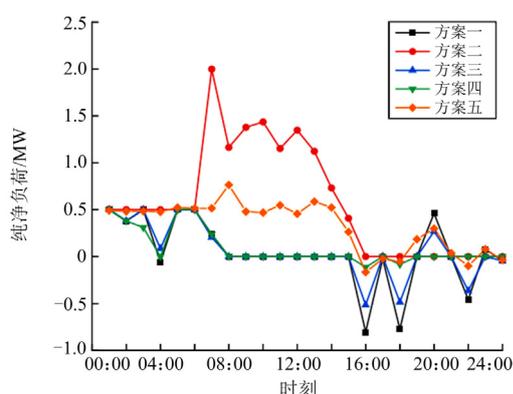


图6 各方案纯净净负荷曲线

Fig. 6 Pure load curve for each scheme

各规划方案都在一定程度上减小了净负荷波动,说明以MT、ESS作为灵活性资源参与配电网规划可以有效提高含高渗透率RE配电网的灵活性。但是单考虑ESS的配置在RE不充裕情况下无法进行提前蓄电,导致配网有向上灵活性需求时没有足够的供给能力,故其对净负荷波动的削减能力较差。另外根据图6和表4,在考虑灵活性指标后,净负荷波动明显减小而且保留有较好的经济性,因此其规划方案更为合理。

4.2.3 考虑供需协同规划策略的优势

为验证考虑需求响应参与配电网灵活性规划的优越性,对方案五的运行结果进行分析。图7为根据净负荷在不同季节的波动特点制定的需求响应补偿电价。图8给出了时序运行模拟各设备出力情况。

其中,春季缺电量集中出现在06:00—22:00,该时段处于峰值电价故采用燃气轮机和储能补偿出力,在13:00—14:00平电价时段削减部分电量进行储能充电,避免在峰值电价时段购电。夏季用电负

荷较大,风电资源集中在18:00之后,在05:00—07:00时段为满足电力平衡,切除部分负荷并转移部分负荷至16:00、18:00可再生能源发电量富足时段,减小MT和ESS的规划容量,降低规划成本。秋季09:00—16:00时段风光资源充裕,优先对储能进行充电,便于在可再生能源发电缺额时刻放电。并且00:00—06:00处于电价谷时段,优先考虑从电网购电,MT作为预备能源提供灵活性裕度。冬季在00:00—07:00风电资源丰富,通过转移处于平电价时段部分负荷以消纳风力发电量,减少ESS的投资,提升可再生能源利用率。综上所述,结合表3可得本文所提供需协同规划策略的有效性,在确保含高比例可再生能源的配电系统灵活性前提下,进一步提升系统规划经济性。

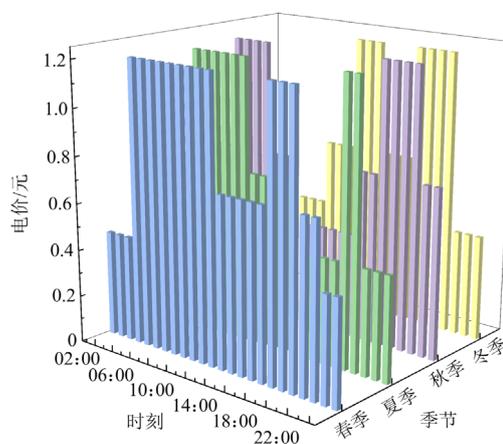
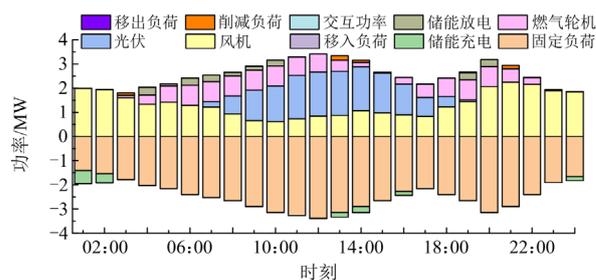
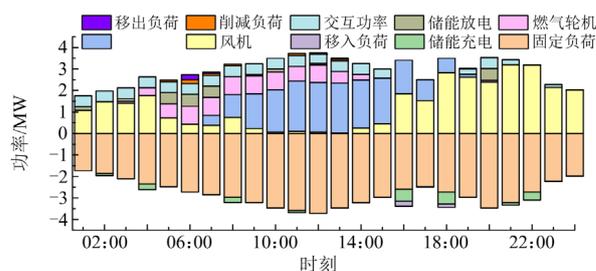


图7 需求响应季节性补偿电价

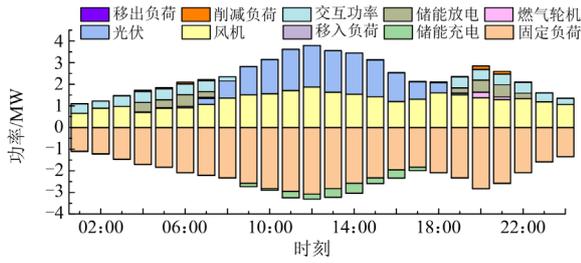
Fig. 7 Demand response seasonal compensation tariff



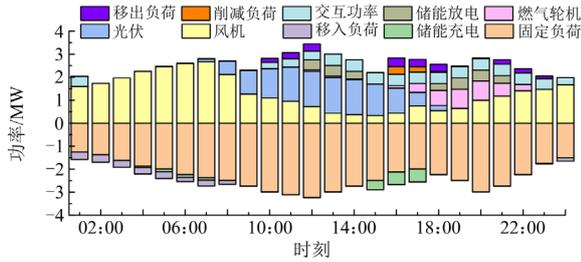
(a) 春季机组调度图



(b) 夏季机组调度图



(c) 秋季机组调度图



(d) 冬季机组调度图

图 8 本文规划方案各机组出力

Fig. 8 Power output of each unit planned by this paper

4.2.4 底层考虑无功优化的优势

为验证本文提出的有功-无功联合优化有助于提升含高渗透率 RE 配电网的无功支撑能力和配电网灵活性规划结果的优越性, 设置以下两个方案进行对比分析。

方案 A: 不考虑无功补偿下进行灵活性资源优化配置;

方案 B: 考虑 SVC 和 CB 无功补偿装置参与灵活性资源优化配置。

1) 对网损影响分析

方案 B 考虑有功-无功联合优化后, 无功补偿装置出力如图 9 所示。节点 5 的 SVC 和节点 15 的 CB 在 05:00 之后的出力明显提升, 由于节点 5 和节点 15 安装有分布式光伏发电系统, 故两者存在同步增长关系。其次节点 15 属于居民区, 故在 12:00 以及 20:00 用电高峰期和可再生能源最大出力时段, 节点 15 的 SVC 增加自身出力以补偿无功。说明无功补偿对含高渗透 RE 配电网运行起到一定影响。

另外, 根据图 9、图 10 可知, 在风光产电过剩和用电高峰时段, 未投入无功补偿装置时网损分别高达 163 kW 和 183 kW, 并且不考虑无功补偿会增加灵活性资源装机容量。而本文采用的有功-无功联合优化策略使得系统网损降低了 49.26%, 避免设备的投资冗余, 总成本降低了 7.85%, 配网灵活性提高了 0.7%, 有效提高系统的稳定性和经济效益。

2) 对节点电压影响分析

两种规划方案的节点电压如图 11 所示, 由于系

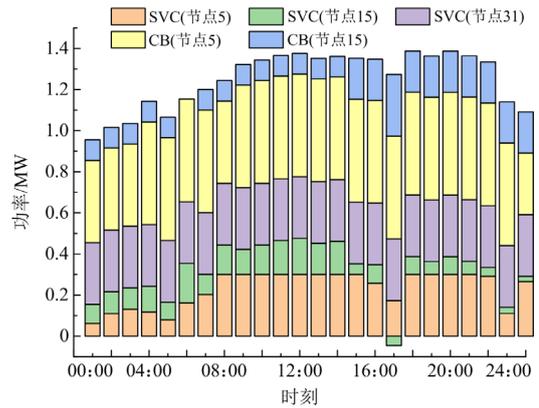


图 9 无功补偿装置出力

Fig. 9 Power output of reactive power compensation device

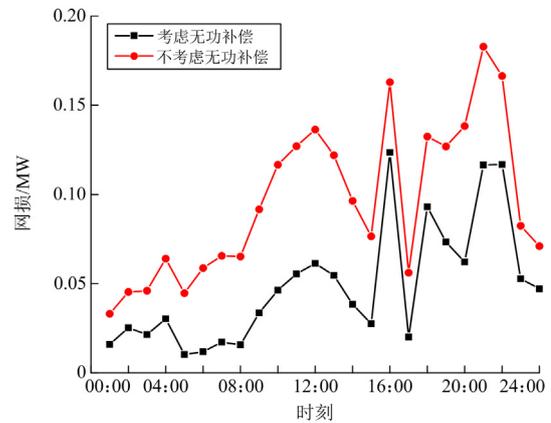
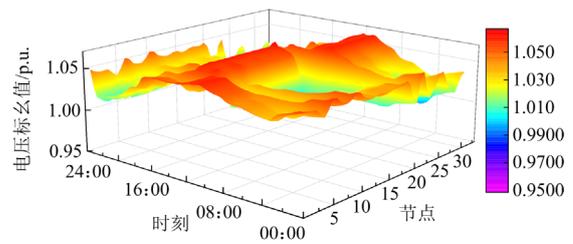
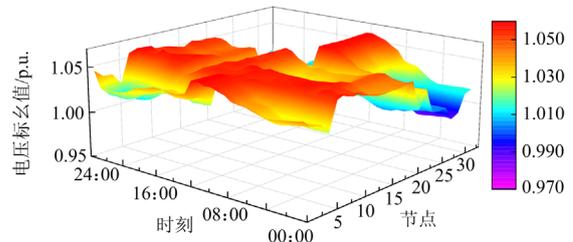


图 10 IEEE33 节点系统有功网损曲线

Fig. 10 Active network loss curve of IEEE33 node system



(a) 不考虑无功补偿的节点电压



(b) 考虑无功补偿的节点电压

图 11 IEEE33 节点系统节点电压对比图

Fig. 11 Comparison chart of IEEE33 node system node voltage

统负荷量较大, 在配置灵活性资源时未考虑无功补偿装置进行无功优化, 导致其整体电压水平偏低, 波动性更强。在考虑 SVC 和 CB 进行无功补偿后电压波动性抑制能力得到明显提升。说明在进行配电网灵活性资源优化配置时, 应考虑有功-无功联合优化, 以提升配电网的安全稳定性。

5 结论

为解决高渗透率 RE 并网对配电网运行灵活性和安全稳定性的影响, 本文以灵活性不足率为指标对配电网灵活性进行评估。建立了考虑季节特性的配电网供需双侧灵活性资源双层优化配置模型。运用 SOCR 和 KKT 将双层 MINLP 转化为单层 MISOCP 进行求解。通过仿真结果对比分析可得以下结论:

1) 本文通过考虑净负荷在不同季节的时序波动特性, 引入灵活性不足率评价指标并建立多目标双层规划模型, 能够合理化配电网灵活性规划结构, 有效提升含高渗透率 RE 配电网的抗干扰能力。

2) 提出的供需协同规划策略, 可以有效促进供需双侧多类型灵活性资源的协同优化, 充分挖掘用户需求响应的灵活性潜力, 显著提升了规划经济性和配电网运行灵活性。

3) 在灵活性资源双层规划模型中考虑有功-无功联合优化策略, 能够有效解决因高渗透率 RE 的高波动性而造成的配电网电压越限、电能质量下降问题, 进一步提升了配电网经济性和稳定性。

本文所提的配电网灵活性资源规划策略具备一定的优势和可行性, 可为新型配电网构建提供参考。下一步将研究路网与电网耦合下, 考虑电动汽车和智能软开关的配电网规划, 进一步提升含高渗透率可再生能源的配电网运行可靠性。

参考文献

- [1] 习近平. 在第七十五届联合国大会一般性辩论上的讲话[R]. 北京: 中华人民共和国国务院, 2020.
XI Jinping. Speech at the general debate of the 75th session of the United Nations general assembly[R]. Beijing: State Council of the People's Republic of China, 2020.
- [2] 林其友, 王艳杰, 杨乐新. 含可再生能源并网的电力系统稳定裕度研究[J]. 电网与清洁能源, 2022, 38(2): 129-134.
LIN Qiyu, WANG Yanjie, YANG Lexin. A study on the stability margin of the power system with renewable energy[J]. Power System and Clean Energy, 2022, 38(2): 129-134.
- [3] 董昱, 梁志峰, 王上行, 等. 新型电力系统下推动储能与新能源协调有序发展的分析与思考[J]. 供用电, 2022, 39(10): 84-92.
- [4] 鲁宗相, 李海波, 乔颖. 高比例可再生能源并网的电力系统灵活性评价与平衡机理[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(1): 9-20.
LU Zongxiang, LI Haibo, QIAO Ying. Flexibility evaluation and supply/demand balance principle of power system with high-penetration renewable electricity[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(1): 9-20.
- [5] 鲁宗相, 林弋莎, 乔颖, 等. 极高比例可再生能源电力系统的灵活性供需平衡[J]. 电力系统自动化, 2022, 46(16): 3-16.
LU Zongxiang, LIN Yisha, QIAO Ying, et al. Flexibility supply-demand balance in power system with ultra-high proportion of renewable energy[J]. Automation of Electric Power Systems, 2022, 46(16): 3-16.
- [6] TAIBI E, NIKOLAKAKIST, GUTIERREZ L, et al. Power system flexibility for the energy transition[R]. Masdar City, Abu Dhabi: IRENA, 2018.
- [7] 李洁, 孙宏宇, 许椿凯, 等. 参与新型电力系统需求响应的分布式储能资源管理与策略研究[J]. 供用电, 2022, 39(2): 29-35.
LI Jie, SUN Hongyu, XU Chunkai, et al. Research on distributed energy storage resource management and strategy participating in demand response of new power systems[J]. Distribution & Utilization, 2022, 39(2): 29-35.
- [8] 赵晶晶, 朱炯达, 李振坤, 等. 考虑灵活性供需鲁棒平衡的两阶段配电网日内分布式优化调度[J]. 电力系统自动化, 2022, 46(16): 61-71.
ZHAO Jingjing, ZHU Jiongda, LI Zhenkun, et al. Two-stage intraday distributed optimal dispatch for distribution network considering robust balance between flexibility supply and demand[J]. Automation of Electric Power Systems, 2022, 46(16): 61-71.
- [9] GAO Shan, LIU Sai, LIU Yu, et al. Flexible and economic dispatching of AC/DC distribution networks considering uncertainty of wind power[J]. IEEE Access, 2019, 7: 100051-100065.
- [10] KLYAPOVSKIY S, YOU S, CAI H M, et al. Incorporate flexibility in distribution grid planning through a framework solution[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2019, 111: 66-78.
- [11] 孙伟卿, 宋赫, 秦艳辉, 等. 考虑灵活性供需不确定性的储能优化配置[J]. 电网技术, 2020, 44(12): 4486-4497.
SUN Weiqing, SONG He, QIN Yanhui, et al. Energy storage system optimal allocation considering flexibility supply and demand uncertainty[J]. Power System Technology, 2020, 44(12): 4486-4497.

- [12] 白雪岩, 樊艳芳, 刘雨佳, 等. 考虑可靠性及灵活性的风光储虚拟电厂分层容量配置[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(8): 11-24.
BAI Xueyan, FAN Yanfang, LIU Yujia, et al. Wind power storage virtual power plant considering reliability and flexibility tiered capacity configuration[J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(8): 11-24.
- [13] REN Zhijun, GUO Hongxia, YANG Ping, et al. Bi-level optimal allocation of flexible resources for distribution network considering different energy storage operation strategies in electricity market[J]. IEEE Access, 2020, 8: 58497-58508.
- [14] 杨珺, 李凤婷, 张高航. 考虑灵活性需求的新能源高渗透系统规划方法[J]. 电网技术, 2022, 46(6): 2171-2182.
YANG Jun, LI Fengting, ZHANG Gaohang. Power system planning method with high new energy penetration considering flexibility requirements[J]. Power System Technology, 2022, 46(6): 2171-2182.
- [15] PAMSHETTI V B, SINGH S P, Coordinated allocation of BESS and SOP in high PV penetrated distribution network incorporating DR and CVR schemes[J]. IEEE Systems Journal, 2022, 16(1): 420-430.
- [16] 胡戎, 邱晓燕, 张志荣. 计及灵活性资源的交直流混合配电网双层优化[J]. 电网技术, 2022, 46(6): 2259-2268.
HU Rong, QIU Xiaoyan, ZHANG Zhirong. Bi-level optimization of AC/DC hybrid distribution network considering flexible resources[J]. Power System Technology, 2022, 46(6): 2259-2268.
- [17] 王成山, 王瑞, 于浩, 等. 配电网形态演变下的协调规划问题与挑战[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(8): 2385-2396.
WANG Chengshan, WANG Rui, YU Hao, et al. Challenges on coordinated planning of smart distribution networks driven by source-network-load evolution[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(8): 2385-2396.
- [18] YANG H J, GAO Y, MA Y H, et al. Optimal modification of peak-valley period under multiple time-of-use schemes based on dynamic load point method considering reliability[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2022, 37(5): 3889-3901.
- [19] XU Biao, ZHANG Guiyuan, LI Ke, et al. Reactive power optimization of a distribution network with high-penetration of wind and solar renewable energy and electric vehicles[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2022, 7(4): 801-813.
- [20] 杨海涛, 吴国旻, 陈西颖, 等. 用于间歇性电源高渗透电网规划的安全性评估方法[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(24): 15-20.
YANG Haitao, WU Guoyang, CHEN Xiying, et al. A security assessment method for power grid planning under high penetration of variable generation[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(24): 15-20.
- [21] 罗钢, 石东源, 陈金富, 等. 风光发电功率时间序列模拟的 MCMC 方法[J]. 电网技术, 2014, 38(2): 321-327.
LUO Gang, SHI Dongyuan, CHEN Jinfu, et al. A Markov Chain Monte Carlo method for simulation of wind and solar power time series[J]. Power System Technology, 2014, 38(2): 321-327.
- [22] 丁明, 解蛟龙, 刘新宇, 等. 面向风电接纳能力评价的风资源/负荷典型场景集生成方法与应用[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(15): 4064-4072.
DING Ming, XIE Jiaolong, LIU Xinyu, et al. The generation method and application of wind resources/load typical scenario set for evaluation of wind power grid integration[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(15): 4064-4072.
- [23] 陈倩, 王维庆, 王海云. 基于需求侧响应的主动配电网双层优化方法[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(16): 1-13.
CHEN Qian, WANG Weiqing, WANG Haiyun. Bi-level optimization model of an active distribution network based on demand response[J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(16): 1-13.
- [24] 程杉, 钟仕凌, 尚冬冬, 等. 考虑电动汽车时空负荷分布特性的主动配电网动态重构[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(17): 1-13.
CHENG Shan, ZHONG Shiling, SHANG Dongdong, et al. Dynamic reconfiguration of an active distribution network considering temporal and spatial load distribution characteristics of electric vehicles[J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(17): 1-13.
- [25] 李本新, 刘振, 陈厚合, 等. 基于主从博弈的输配电网协同经济调度[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(18): 131-140.
LI Benxin, LIU Zhen, CHEN Houhe, et al. Collaborative economic dispatch of coupled transmission and distribution networks based on the Stackelberg game[J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(18): 131-140.
- [26] 程杉, 徐建宇, 何畅, 等. 计及不确定性的综合能源系统容量规划方法[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(18): 17-24.
CHENG Shan, XU Jianyu, HE Chang, et al. Optimal capacity planning of an integrated energy system considering uncertainty[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(18): 17-24.

收稿日期: 2023-05-17; 修回日期: 2023-09-20

作者简介:

程杉(1981—), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 研究方向为电力系统运行优化与控制、智能电网能量管理与优化、智能计算及其应用等; E-mail: hpucquyzu@ctgu.edu.cn

傅桐(1998—), 男, 硕士研究生, 研究方向为电力系统运行与控制。E-mail: 2502647256@qq.com

(编辑 许威)