

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.240406

计及低碳与经济的配电网源-网-荷-储协同规划模型

陈鑫¹, 王果¹, 闵永智¹, 葛磊蛟^{1,2}, 李瑞¹, 李政³

(1. 兰州交通大学自动化与电气工程学院, 甘肃 兰州 730070; 2. 天津大学电气自动化与信息工程学院, 天津 300072; 3. 甘肃省交通科学院研究集团有限公司, 甘肃 兰州 730070)

摘要: “双碳”目标下为加强配电网层面供-需双向支撑能力, 实现更精细规划, 考虑源、网、荷、储协同参与, 提出一种计及低碳与经济的配电网源-网-荷-储协同规划模型。首先, 描述源、荷出力时序特性与负荷需求响应。然后, 联合多灵活资源与主动管理措施建立源-网-荷-储三层规划运行模型。上层规划层以综合成本低、碳排放量少为原则进行源、网、储的选址定容; 中层调度层以“双碳”政策、经济运行、电压优质为导向进行源、网、荷、储各主体的出力方案调度; 下层重构层以网侧有功损耗最小为目标进行网架拓扑重构。针对模型特征, 上层、中层用改进的快速非支配排序遗传算法(improved non-dominated sorting genetic algorithm-II, INSGA2)与模糊隶属度方法结合求解, 下层采用改进遗传算法(improved genetic algorithm, IGA)求解。最后, 采用西北某地区实际数据进行仿真分析。结果表明, 所提方法可适应“双碳”目标, 提高规划调度经济性, 确定主动管理措施运行方案, 有效削峰填谷, 优化网架结构。

关键词: 配电网规划; 源网荷储三层协同; 低碳; 经济; 优质

A source-network-load-storage collaborative planning model for a distribution network considering low carbon and economy

CHEN Xin¹, WANG Guo¹, MIN Yongzhi¹, GE Leijiao^{1,2}, LI Rui¹, LI Zheng³

(1. School of Automation and Electrical Engineering, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou 730070, China;
2. School of Electrical and Information Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China;
3. Gansu Academy of Transportation Sciences Research Group Co., Ltd., Lanzhou 730070, China)

Abstract: To strengthen the bidirectional supply-demand support capability at the distribution network level and achieve more refined planning under the “dual-carbon” target, this paper proposes a source-network-load-storage collaborative planning model of distribution networks, considering both low carbon and economy. First, the sequential characteristics of source and load output and load demand response are described. Second, a three-layer planning operation model of source-network-load-storage is established by combining multiple flexible resources and active management measures. The upper planning layer selects the location and capacity of the source, network and storage based on the principle of low comprehensive cost and low carbon emission. The middle scheduling layer optimizes the output scheduling of the main body of the source, network, load and storage, guided by the “dual-carbon” policy, economic operation and voltage quality. The lower reconfiguration layer reconstructs the network topology to minimize active power loss on the network side. Then, according to the characteristics of the model, the upper and middle layers are solved by the improved non-dominated sorting genetic algorithm-II (INSGA2) and the fuzzy membership degree method, while the lower layer is solved by an improved genetic algorithm (IGA). Finally, a case study is conducted using real data from a northwestern region of China. Simulation results show that the proposed method can adapt to the “dual-carbon” target, improve the economy of planning and dispatching, determine optimal active management strategies, provide effective peak shaving and valley filling, and optimize grid structure.

This work is supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 52467007).

Key words: distribution network planning; three-layer source-network-load-storage coordination; low carbon; economy; high quality

基金项目: 国家自然科学基金项目资助(52467007); 甘肃省重点研发科技计划项目资助(22YF11GA298); 国网陕西省电力公司科技项目资助(SGSNAK00FCJS2401176); 强电磁技术全国重点实验室开放课题资助(AET 2023KF004)

0 引言

新型电力系统是实现碳中和的关键抓手，需要统筹源、网、荷、储资源，以源-网-荷-储互动为支撑^[1-2]。随着清洁能源、储能技术与配套设施的发展，以风力发电(wind generator, WG)、光伏发电(photovoltaic, PV)为主体的分布式电源(distributed generator, DG)规模化接入以及负荷侧需求响应(demand response, DR)、电池储能系统(battery energy storage system, BESS)接入中压配电网，一方面，由于多主体参与规划^[3-5]，各主体灵活多变的运行策略^[6]增加了配电网规划的复杂性，另一方面，由于出力随机性、不确定性影响电压质量，增加了配电网运行的风险性^[7]，通过协同规划与统一调控资源可在一定程度上进行改善。因此从系统角度出发，兼顾低碳性与经济性，结合有载调压开关(on-load tap changer, OLTC)、补偿电容(capacitor banks, CB)、静止无功补偿装置(static var compensation, SVC)、DR 等措施，统一规划源、网、荷、储，对电力系统安全、低碳、经济运行具有重要意义。

配电网多主体协同规划已有相关研究，且多以经济性为导向^[8-15]。文献[8]以“源”为研究主体，以提高风光并网后电压稳定性为落脚，提出一种考虑电压稳定性的 DG 规划方法；文献[9]以“源-储”为研究主体，从“源”侧出发，以提高配电网 DG 消纳能力为落脚，提出一种考虑储能接入的 DG 双层规划方法；文献[10]以“源-荷”为研究主体，从“源”侧出发，以减少电压越限和清洁能源弃电为落脚，提出一种多时间尺度的配电网双层规划方法；文献[11]以“源-荷”为研究主体，从“荷”侧出发，以提高配电网光伏消纳能力为落脚，提出一种分时电价优化方法；文献[12-13]以“源-网-荷”为研究主体，考虑可中断负荷与可转移负荷需求响应，建立三层模型；文献[14]以“源-网-储”为研究主体，协同考虑设备选址定容、网架扩展及配电网动态重构等目标，提出多时间尺度配电网规划方法；文献[15]以“源-荷-储”为研究主体，以全社会综合经济效益为落脚，考虑可中断负荷需求响应，建立双层模型。上述文献均侧重于以经济为导向的多个主体协同规划。

但目前对于“源-网-荷-储”全主体参与协同规划的研究相对较少。文献[16]以经济性为导向，将配电网运行分解为“调度-重构”两个阶段，建立网架动态重构模型，但主要侧重于“源-网-储”的协同运行；文献[17]以环保性为导向，建立“源-网-荷-储”协同优化运行的发电双层规划模型，但主要

侧重于“源”侧规划；文献[18]以经济性为导向，考虑综合能源，建立共享储能多目标配置双层规划模型，但主要侧重于“储”侧规划；文献[19]以经济性为导向，提出含智能软开关的配电网双层规划模型，但对环保性考虑偏少；文献[20]以经济性为导向，综合考虑“源-网-荷-储”协同优化运行，提出交直流混合配电网双层规划模型。以上研究从模型层级看多采用双层建模方法，从目标导向看多侧重单一经济性，从参与主体看协同规划模型不够完善。

综上分析可知，从系统角度出发，对电碳耦合驱动下兼顾低碳性与经济性的“源-网-荷-储”整体协同规划研究较少。为此，从“规划-调度-重构”提出一种计及低碳与经济的配电网源-网-荷-储协同规划模型。首先，考虑源、荷不确定性因素，基于概率模型与多场景分析法，分析风、光、荷的时序特性模型以及负荷需求响应模型；然后建立三层规划运行模型，上层规划层以碳排放量和综合成本最小为目标进行 WG、PV、CB、SVC、BESS 的选址定容以及线路规划，中层调度层以上层规划方案为前提，以碳排放量少、运行成本低、电压偏移小为目标进行 WG、PV、CB、SVC、OLTC、DR、BESS 的出力调控，下层重构层在中层调度方案下以有功损耗最小为目标进行网架重构；接着针对模型特征采用改进的快速非支配排序遗传算法(improved non-dominated sorting genetic algorithm-II, INSGA2)与模糊隶属度结合以及改进的遗传算法(improved genetic algorithm, IGA)进行求解；最后以西北某地区电网实际数据进行仿真分析，验证了所提模型的必要性与有效性。

1 DG 和负荷出力时序特性

配电网中不确定性主要由 DG 与负荷引起。本文 DG 主要考虑 PV 与 WG，其有功出力与外部环境息息相关，季节特性明显，具有较强的时序性与不确定性；负荷主要考虑居民负荷。

1.1 “源”侧—DG 出力时序特性及潮流计算

针对 DG 时序性，由于同一季节相同时刻风速及光照强度数据基本相同，而不同季节不同时刻有较大差异^[21]，因此采用季节场景与时段划分的方法，将一年划分为春夏秋冬 4 个典型场景，将一天划分为 24 个时段；针对 DG 不确定性，建立概率模型进行描述，其中日照强度采用 Beta 分布^[22]，风速采用 Weibull 分布^[22]。首先通过历史数据获得各概率模型各时段形状参数，然后采用蒙特卡洛模拟生成风速、光照强度，接着通过 K-means 聚类^[23]得到 4 个季节各时段的典型风速、光照强度时序曲线，

最后通过推算获得有功出力时序曲线。

在潮流计算中, 风机、光伏的稳态运行采用定功率因数控制策略, 均作 PQ 节点处理^[19]。

1.2 “荷”侧—负荷出力时序特性及需求响应

针对负荷不确定性, 采用正态分布描述^[20]。潮流计算中负荷采用恒功率模型^[19], 作 PQ 节点处理。

需求响应是指负荷侧根据分时电价或者激励机制改变正常电力消费模式而做出响应, 本文主要研究基于分时电价的价格型需求响应, 通过可转移负荷来实现, 可将部分高峰时段负荷转移至低谷时段, 但不能超过一定限值, 其模型如式(1)所示。

$$\begin{cases} r_{\min} \cdot P_{\text{Load}}^{s,t,i} \leq P_{\text{in}}^{s,t,i} \leq r_{\max} \cdot P_{\text{Load}}^{s,t,i} \\ s_{\min} \cdot P_{\text{Load}}^{s,t,i} \leq P_{\text{out}}^{s,t,i} \leq s_{\max} \cdot P_{\text{Load}}^{s,t,i} \\ \sum_{s=1}^4 \sum_{t=1}^{24} P_{\text{in}}^{s,t,i} = \sum_{s=1}^4 \sum_{t=1}^{24} P_{\text{out}}^{s,t,i} \end{cases} \quad (1)$$

式中: $P_{\text{in}}^{s,t,i}$ 、 $P_{\text{out}}^{s,t,i}$ 分别为 s 季节 t 时段 i 节点的负荷转入、转输出功率; $P_{\text{Load}}^{s,t,i}$ 为 s 季节 t 时段 i 节点有功功率; r_{\max} 、 r_{\min} 分别为负荷转入功率系数上、下限; s_{\max} 、 s_{\min} 分别为负荷转输出功率系数上、下限。

2 源-网-荷-储协同规划运行三层模型

建立了典型时序场景下源-网-荷-储协同规划运行三层模型。模型各层传递关系如图 1 所示。上层规划层以 DG、CB、SVC、BESS 选址定容和线路规划为决策变量; 中层调度层以各时序场景下 DG 出力、CB 投切组数、SVC 出力、OLTC 档位、负荷转移系数、BESS 充放电功率为决策变量; 下层重构层以各时序场景下联络开关开断为决策变量。此三层模型联合规划与模拟运行, 可模拟实际工况。

2.1 上层规划层

2.1.1 上层目标函数

规划层以系统的碳排放量 f_{carbon} 和综合成本 f_{cost} 最小为目标, 即 $\min F_{\text{up}}$, 为多目标优化问题, 如式(2)所示。其中碳排放量由向上级火电厂的购电量换算产生; 综合成本基于全寿命周期理论产生, 包括上层投资成本 C_{invest} 、中层调度成本 C_{sch} 、下层重构成本 C_{rec} 。 C_{invest} 中“源”侧包括 DG 投资费用, “网”侧包括线路投资费用、CB 投资费用、SVC 投资费用, “储”侧包括 BESS 投资费用; C_{sch} 中“源”侧包括 DG 运维费用、弃风弃光费用, “网”侧包括线路运维费用、CB 运维费用、SVC 运维费用、OLTC 动作费用, “储”侧包括 BESS 运维费用; C_{rec} 中“网”侧包括联络开关重构费用、向上级火电厂购电费用。

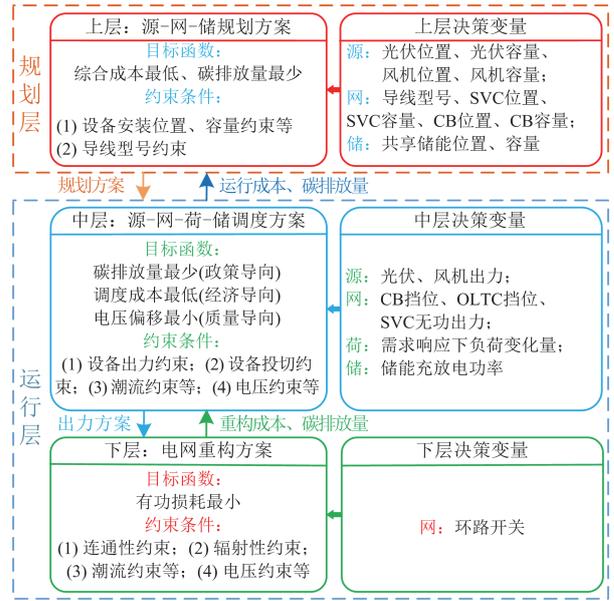


图 1 模型各层传递关系

Fig. 1 Transfer relationship of each layer of the model

$$\min F_{\text{up}} = (f_{\text{carbon}}, f_{\text{cost}}) \quad (2)$$

式(2)各项参数具体计算方法如下。

1) 碳排放量 f_{carbon}

$$f_{\text{carbon}} = \left(\sum_{s=1}^4 D_s \sum_{t=1}^{24} P_{s,t,0} \right) \cdot (\xi_{\text{CO}_2} + \xi_{\text{NO}_x} + \xi_{\text{SO}_2}) \quad (3)$$

式中: $P_{s,t,0}$ 为 s 季节 t 时段根节点流入本级电网的有功功率; D_s 为 s 季节天数; ξ_{CO_2} 、 ξ_{NO_x} 、 ξ_{SO_2} 分别为污染气体 CO_2 、 NO_x 、 SO_2 单位电量的排放系数, 分别取 886 g/kWh 、 1.5 g/kWh 、 1.8 g/kWh 。

2) 综合成本 f_{cost}

$$\begin{cases} f_{\text{cost}} = C_{\text{invest}} + C_{\text{sch}} + C_{\text{rec}} \\ C_{\text{invest}} = C_{\text{invest}}^{\text{DG}} + C_{\text{invest}}^{\text{Line}} + C_{\text{invest}}^{\text{CB}} + C_{\text{invest}}^{\text{SVC}} + C_{\text{invest}}^{\text{BESS}} \\ C_{\text{sch}} = C_{\text{sch}}^{\text{DG,run}} + C_{\text{sch}}^{\text{DG,punish}} + C_{\text{sch}}^{\text{Line}} + C_{\text{sch}}^{\text{CB}} + C_{\text{sch}}^{\text{SVC}} + C_{\text{sch}}^{\text{OLTC}} + C_{\text{sch}}^{\text{BESS}} \\ C_{\text{rec}} = C_{\text{rec}}^{\text{Switch}} + C_{\text{rec}}^{\text{Purchase}} \end{cases} \quad (4)$$

(1) 上层投资成本 C_{invest}

“源”侧—DG 投资费用 $C_{\text{invest}}^{\text{DG}}$ 为

$$\begin{aligned} C_{\text{invest}}^{\text{DG}} &= c_{\text{invest}}^{\text{WG}} \cdot \left(\sum_{i=1}^N N_{\text{invest}}^{\text{WG},i} \right) \cdot \frac{r(1+r)^{T_{\text{WG}}}}{(1+r)^{T_{\text{WG}}} - 1} + \\ & c_{\text{invest}}^{\text{PV}} \cdot \left(\sum_{i=1}^N N_{\text{invest}}^{\text{PV},i} \right) \cdot \frac{r(1+r)^{T_{\text{PV}}}}{(1+r)^{T_{\text{PV}}} - 1} \end{aligned} \quad (5)$$

式中: $c_{\text{invest}}^{\text{WG}}$ 、 $c_{\text{invest}}^{\text{PV}}$ 分别为风机、光伏单台投资费用; N 为配电网节点数; $N_{\text{invest}}^{\text{WG},i}$ 、 $N_{\text{invest}}^{\text{PV},i}$ 分别为 i 节点风机、光伏的配置数量, 为整型变量; r 为贴现率,

取 6%； T_{WG} 、 T_{PV} 分别为风机、光伏的全寿命周期，取 25 年。

“网”侧—线路投资费用 C_{invest}^{Line} 为

$$C_{invest}^{Line} = \sum_{ij \in N_{Line}} \sum_{m=1}^{n_L} (c_{buy,m}^{Line} + c_{strip}^{Line} + c_{install,m}^{Line}) \cdot N_{invest,m}^{Line,ij} \cdot \frac{r(1+r)^{T_{Line}}}{(1+r)^{T_{Line}} - 1} \quad (6)$$

式中： $c_{buy,m}^{Line}$ 为 m 型号导线单位长度购买费用； c_{strip}^{Line} 为原有单位导线拆除费用； $c_{install,m}^{Line}$ 为 m 型号导线单位长度安装费用； $N_{invest,m}^{Line,ij}$ 为更换的 m 型号线路 ij 的长度； n_L 为线路型号数量； N_{Line} 为线路集合； T_{Line} 为导线的全寿命周期，本文取 25 年。

“网”侧—CB 投资费用 C_{invest}^{CB} 为

$$C_{invest}^{CB} = c_{invest}^{CB} \cdot \left(\sum_{i=1}^N N_{invest}^{CB,i} \cdot Q_{rate}^{CB} \right) \cdot \frac{r(1+r)^{T_{CB}}}{(1+r)^{T_{CB}} - 1} \quad (7)$$

式中： c_{invest}^{CB} 为 CB 单位容量投资费用； $N_{invest}^{CB,i}$ 为 i 节点 CB 配置数量，为整型变量； Q_{rate}^{CB} 为单组 CB 的额定容量； T_{CB} 为 CB 的全寿命周期，取 25 年。

“网”侧—SVC 投资费用 C_{invest}^{SVC} 为

$$C_{invest}^{SVC} = c_{invest}^{SVC} \cdot \left(\sum_{i=1}^N Q_{rate}^{SVC,i} \right) \cdot \frac{r(1+r)^{T_{SVC}}}{(1+r)^{T_{SVC}} - 1} \quad (8)$$

式中： c_{invest}^{SVC} 为 SVC 单位容量投资费用； $Q_{rate}^{SVC,i}$ 为 i 节点 SVC 的装机容量； T_{SVC} 为 SVC 的全寿命周期，取 25 年。

“储”侧—BESS 投资费用 C_{invest}^{BESS} 为

$$C_{invest}^{BESS} = c_{invest}^{BESS} \cdot \left(\sum_{i=1}^N N_{invest}^{BESS,i} \right) \cdot \frac{r(1+r)^{T_{BESS}}}{(1+r)^{T_{BESS}} - 1} \quad (9)$$

式中： c_{invest}^{BESS} 为 BESS 单台投资费用； $N_{invest}^{BESS,i}$ 为 i 节点 BESS 配置数量，为整型变量； T_{BESS} 为 BESS 的全寿命周期，取 25 年。

(2) 中层调度成本 C_{sch}

“源”侧—DG 运维费用 $C_{sch}^{DG,run}$ 为

$$C_{sch}^{DG,run} = \sum_{s=1}^4 D_s \cdot \left(\sum_{t=1}^{24} \sum_{i=1}^N c_{sch}^{DG,run} \cdot P_{sch}^{WG,s,t,i} + \sum_{t=1}^{24} \sum_{i=1}^N c_{sch}^{PV,run} \cdot P_{sch}^{PV,s,t,i} \right) \quad (10)$$

式中： $c_{sch}^{DG,run}$ 、 $c_{sch}^{PV,run}$ 分别为风机、光伏单位发电量的运维费用； $P_{sch}^{WG,s,t,i}$ 、 $P_{sch}^{PV,s,t,i}$ 分别为风机、光伏 s 季节 t 时段在节点 i 的有功出力。

“源”侧—弃风弃光费用 $C_{sch}^{DG,punish}$ 为

$$C_{sch}^{DG,punish} = \sum_{s=1}^4 D_s \cdot \sum_{t=1}^{24} \sum_{i=1}^N c_{sch}^{DG,punish} \cdot (P_{max}^{WG,s,t,i} - P_{sch}^{WG,s,t,i}) + \sum_{s=1}^4 D_s \cdot \sum_{t=1}^{24} \sum_{i=1}^N c_{sch}^{PV,punish} \cdot (P_{max}^{PV,s,t,i} - P_{sch}^{PV,s,t,i}) \quad (11)$$

式中： $c_{sch}^{DG,punish}$ 、 $c_{sch}^{PV,punish}$ 分别为单位弃风、弃光的惩罚费用； $P_{max}^{WG,s,t,i}$ 、 $P_{max}^{PV,s,t,i}$ 分别为风机、光伏 s 季节 t 时段在节点 i 的最大有功功率输出。

“网”侧—线路运维费用 C_{sch}^{Line} 为

$$C_{sch}^{Line} = \sum_{s=1}^4 D_s \cdot \left(\sum_{t=1}^{24} \sum_{n=1}^{n_{Line}} c_{sch}^{Line} \cdot l^{s,t,n} \right) \quad (12)$$

式中： c_{sch}^{Line} 为单位线路运维费用； n_{Line} 为线路的总数量； $l^{s,t,n}$ 为 s 季节 t 时段第 n 条线路的长度。

“网”侧—CB 运维费用 C_{sch}^{CB} 为

$$C_{sch}^{CB} = \sum_{s=1}^4 D_s \cdot \left(\sum_{t=1}^{24} \sum_{i=1}^N c_{sch}^{CB} \cdot Q_{sch}^{CB,s,t,i} \right) \quad (13)$$

式中： c_{sch}^{CB} 为单位容量 CB 的运维费用； $Q_{sch}^{CB,s,t,i}$ 为 s 季节 t 时段在节点 i 的 CB 投切容量。

“网”侧—SVC 运维费用 C_{sch}^{SVC} 为

$$C_{sch}^{SVC} = \sum_{s=1}^4 D_s \cdot \left(\sum_{t=1}^{24} \sum_{i=1}^N c_{sch}^{SVC} \cdot Q_{sch}^{SVC,s,t,i} \right) \quad (14)$$

式中： c_{sch}^{SVC} 为单位容量 SVC 的运维费用； $Q_{sch}^{SVC,s,t,i}$ 为 s 季节 t 时段在节点 i 的 SVC 无功出力。

“网”侧—OLTC 动作费用 C_{sch}^{OLTC} 为

$$C_{sch}^{OLTC} = \sum_{s=1}^4 D_s \cdot \left(\sum_{t=1}^{24} c_{sch}^{OLTC} \cdot N_{sch}^{OLTC,s,t} \right) \quad (15)$$

式中： c_{sch}^{OLTC} 为 OLTC 的单个动作费用； $N_{sch}^{OLTC,s,t}$ 为 s 季节 t 时段 OLTC 动作次数，为 0-1 变量。

“储”侧—BESS 运维费用 C_{sch}^{BESS} 为

$$C_{sch}^{BESS} = \sum_{s=1}^4 D_s \cdot \left(\sum_{t=1}^{24} \sum_{i=1}^N c_{sch}^{BESS} \cdot (P_{sch}^{BESS_{ch},s,t,i} + P_{sch}^{BESS_{dch},s,t,i}) \right) \quad (16)$$

式中： c_{sch}^{BESS} 为 BESS 单位充放电功率的运维费用； $P_{sch}^{BESS_{ch},s,t,i}$ 、 $P_{sch}^{BESS_{dch},s,t,i}$ 分别为 s 季节 t 时段在节点 i 的 BESS 的充、放电功率。

(3) 下层重构成本 C_{rec}

“网”侧—联络开关重构费用 C_{rec}^{Switch} 为

$$C_{rec}^{Switch} = \sum_{s=1}^4 D_s \cdot \left(\sum_{t=1}^{24} \sum_{ij \in N_{Line}} c_{rec}^{Switch} \cdot (|\alpha_{rec}^{s,t,ij} - \alpha_{rec}^{s,t-1,ij}|) \right) \quad (17)$$

式中： c_{rec}^{Switch} 为联络开关动作费用； $\alpha_{rec}^{s,t,ij}$ 为 s 季节 t

时段线路 ij 的开断状态。

“网”侧—向上级火电厂购电费用 $C_{\text{rec}}^{\text{Purchase}}$ 为

$$C_{\text{rec}}^{\text{Purchase}} = \sum_{s=1}^4 D_s \cdot \left(\sum_{t=1}^{24} C_{\text{rec}}^{\text{Purchase},s,t} \cdot P_{s,t,0} \right) \quad (18)$$

式中, $C_{\text{rec}}^{\text{Purchase},s,t}$ 为 s 季节 t 时段向上级火电厂的单位购电费用。

2.1.2 上层约束条件

1) “源”侧

(1) DG 数量约束

$$\begin{cases} 0 \leq \sum_{i=1}^N N_{\text{invest}}^{\text{WG},i} \leq N_{\text{max}}^{\text{WG}} \\ 0 \leq \sum_{i=1}^N N_{\text{invest}}^{\text{PV},i} \leq N_{\text{max}}^{\text{PV}} \end{cases} \quad (19)$$

式中, $N_{\text{max}}^{\text{WG}}$ 、 $N_{\text{max}}^{\text{PV}}$ 分别为风机、光伏的最大安装数量限制。

(2) DG 容量约束

$$\left(\sum_{i=1}^N N_{\text{invest}}^{\text{WG},i} \cdot P_{\text{rate}}^{\text{WG}} + \sum_{i=1}^N N_{\text{invest}}^{\text{PV},i} \cdot P_{\text{rate}}^{\text{PV}} \right) \leq \mu \cdot P_{\text{Load}} \quad (20)$$

式中: $P_{\text{rate}}^{\text{WG}}$ 、 $P_{\text{rate}}^{\text{PV}}$ 、 P_{Load} 分别为单台风机额定容量、单台光伏额定容量、系统负荷总容量; μ 为 DG 渗透率, 本文取 100%。

2) “网”侧

(1) 线路约束

线路更换后的型号不应小于更换前型号。

(2) CB 数量约束

$$0 \leq \sum_{i=1}^N N_{\text{invest}}^{\text{CB},i} \leq N_{\text{max}}^{\text{CB}} \quad (21)$$

式中, $N_{\text{max}}^{\text{CB}}$ 为 CB 的最大安装数量限制。

(3) SVC 容量约束

$$0 \leq \sum_{i=1}^N Q_{\text{rate}}^{\text{SVC},i} \leq Q_{\text{max}}^{\text{SVC}} \quad (22)$$

式中, $Q_{\text{max}}^{\text{SVC}}$ 为 SVC 的最大安装容量限制。

3) “储”侧

BESS 数量约束

$$0 \leq \sum_{i=1}^N N_{\text{invest}}^{\text{BESS},i} \leq N_{\text{max}}^{\text{BESS}} \quad (23)$$

式中, $N_{\text{max}}^{\text{BESS}}$ 为 BESS 的最大安装数量限制。

2.2 中层调度层

2.2.1 中层目标函数

调度层以“双碳”政策、电压优质、调度经济为导向, 即以系统碳排放量 f_{carbon} 、电压偏移 f_{voltage} 与调度成本 f_{cost} 最小为目标, 即 $\min F_{\text{middle}}$, 得到最优折衷调度方案, 为多目标优化问题, 如式(24)所示。

$$\min F_{\text{middle}} = (f_{\text{carbon}}, f_{\text{voltage}}, f_{\text{cost}}) \quad (24)$$

f_{voltage} 具体计算方法如式(25)所示。

$$f_{\text{voltage}} = \sum_{s=1}^4 D_s \cdot \left(\sum_{t=1}^{24} \left(\sum_{i=1}^N |V_{\text{pu}}^{s,t,i} - 1| \right) \right) \quad (25)$$

式中, $V_{\text{pu}}^{s,t,i}$ 为 s 季节 t 时段节点 i 的电压标么值。

2.2.2 中层约束条件

1) 系统

节点电压法潮流约束为

$$\begin{cases} P_{s,t,i} = V_{s,t,i} \cdot \sum_{j=1}^N V_{s,t,j} (G_{ij} \cos \theta_{s,t,ij} + B_{ij} \sin \theta_{s,t,ij}) \\ Q_{s,t,i} = V_{s,t,i} \cdot \sum_{j=1}^N V_{s,t,j} (G_{ij} \sin \theta_{s,t,ij} - B_{ij} \cos \theta_{s,t,ij}) \end{cases} \quad (26)$$

式中: $P_{s,t,i}$ 、 $Q_{s,t,i}$ 分别为 s 季节 t 时段节点 i 的等效有功功率、无功功率; $V_{s,t,i}$ 、 $V_{s,t,j}$ 分别为 s 季节 t 时段节点 i 、 j 的电压幅值; G_{ij} 、 B_{ij} 分别为节点 i 、 j 之间的电导与电纳; $\theta_{s,t,ij}$ 为 s 季节 t 时段节点 i 、 j 之间的相角差。

电压约束为

$$V_{\text{pu,min}} \leq V_{\text{pu}}^{s,t,i} \leq V_{\text{pu,max}} \quad (27)$$

式中, $V_{\text{pu,max}}$ 、 $V_{\text{pu,min}}$ 分别为电压标么值上、下限。

电流约束为

$$I_{s,t,ij} \leq I_{ij,\text{max}} \quad (28)$$

式中: $I_{s,t,ij}$ 为 s 季节 t 时段线路 ij 的电流值; $I_{ij,\text{max}}$ 为线路 ij 允许电流的最大值。

2) “源”侧

DG 出力约束为

$$\begin{cases} 0 \leq P_{\text{sch}}^{\text{WG},s,t,i} \leq P_{\text{max}}^{\text{WG},s,t,i} \\ 0 \leq P_{\text{sch}}^{\text{PV},s,t,i} \leq P_{\text{max}}^{\text{PV},s,t,i} \\ Q_{\text{sch}}^{\text{WG},s,t,i} = P_{\text{sch}}^{\text{WG},s,t,i} \cdot \tan \varphi_{\text{WG}} \\ Q_{\text{sch}}^{\text{PV},s,t,i} = P_{\text{sch}}^{\text{PV},s,t,i} \cdot \tan \varphi_{\text{PV}} \end{cases} \quad (29)$$

式中: $Q_{\text{sch}}^{\text{WG},s,t,i}$ 、 $Q_{\text{sch}}^{\text{PV},s,t,i}$ 分别为风机、光伏 s 季节 t 时段在节点 i 的无功出力; φ_{WG} 、 φ_{PV} 分别为风机、光伏的功率因数角, 为恒定值。

3) “网”侧

CB 投切约束为

$$\begin{cases} Q_{\text{sch}}^{\text{CB},s,t,i} = g_{\text{CB}}^{s,t,i} \cdot Q_{\text{rate}}^{\text{CB}} \\ 0 \leq g_{\text{CB}}^{s,t,i} \leq N_{\text{invest}}^{\text{CB},i} \end{cases} \quad (30)$$

式中, $g_{\text{CB}}^{s,t,i}$ 为 s 季节 t 时段在节点 i 的 CB 投切组数。

SVC 出力约束为

$$Q_{\text{min}}^{\text{SVC},i} \leq Q_{\text{sch}}^{\text{SVC},s,t,i} \leq Q_{\text{max}}^{\text{SVC},i} \quad (31)$$

式中, $Q_{\max}^{\text{SVC},i}$ 、 $Q_{\min}^{\text{SVC},i}$ 分别为 SVC 的无功出力上、下限, 由上层模型得到。

OLTC 动作约束为

$$r_{\text{OLTC}}^{\min} \leq r_{\text{OLTC}}^{s,t} \leq r_{\text{OLTC}}^{\max} \quad (32)$$

式中, $r_{\text{OLTC}}^{s,t}$ 、 r_{OLTC}^{\min} 、 r_{OLTC}^{\max} 分别为 s 季节 t 时段 OLTC 挡位、OLTC 最小挡位、OLTC 最大挡位。OLTC 其他相关约束参考文献[24]。

4) “荷”侧

DR 约束

可转移负荷约束参见式(1)。

5) “储”侧

BESS 约束

$$\left\{ \begin{array}{l} \xi_{\text{sch}}^{\text{BESS}_{\text{ch}},s,t,i} + \xi_{\text{sch}}^{\text{BESS}_{\text{dch}},s,t,i} \leq 1 \\ 0 \leq P_{\text{sch}}^{\text{BESS}_{\text{ch}},s,t,i} \leq \xi_{\text{sch}}^{\text{BESS}_{\text{ch}},s,t,i} \cdot (N_{\text{invest}}^{\text{BESS},i} \cdot P_{\text{rate}}^{\text{BESS}_{\text{ch}}}) \\ 0 \leq P_{\text{sch}}^{\text{BESS}_{\text{dch}},s,t,i} \leq \xi_{\text{sch}}^{\text{BESS}_{\text{dch}},s,t,i} \cdot (N_{\text{invest}}^{\text{BESS},i} \cdot P_{\text{rate}}^{\text{BESS}_{\text{dch}}}) \\ E_{\text{sch}}^{\text{BESS},s,t+1,i} = E_{\text{sch}}^{\text{BESS},s,t,i} + \left(\frac{P_{\text{sch}}^{\text{BESS}_{\text{ch}},s,t,i} \cdot \eta_{\text{sch}}^{\text{BESS}_{\text{ch}}} - P_{\text{sch}}^{\text{BESS}_{\text{dch}},s,t,i} / \eta_{\text{sch}}^{\text{BESS}_{\text{dch}}}}{E_{\text{sch}}^{\text{BESS},s,t,i}} \right) \\ 0.2E_{\text{max}}^{\text{BESS},i} \leq E_{\text{sch}}^{\text{BESS},s,t,i} \leq 0.9E_{\text{max}}^{\text{BESS},i} \\ E_{\text{sch}}^{\text{BESS},s,1,i} = 0.5E_{\text{max}}^{\text{BESS},i} \end{array} \right. \quad (33)$$

式中: $\xi_{\text{sch}}^{\text{BESS}_{\text{ch}},s,t,i}$ 、 $\xi_{\text{sch}}^{\text{BESS}_{\text{dch}},s,t,i}$ 分别为 s 季节 t 时段 i 节点 BESS 的充电、放电状态, 为 0-1 变量; $P_{\text{rate}}^{\text{BESS}_{\text{ch}}}$ 、 $P_{\text{rate}}^{\text{BESS}_{\text{dch}}}$ 分别为 BESS 额定充电、放电功率; $\eta_{\text{sch}}^{\text{BESS}_{\text{ch}}}$ 、 $\eta_{\text{sch}}^{\text{BESS}_{\text{dch}}}$ 分别为 BESS 充电、放电效率; $E_{\text{sch}}^{\text{BESS},s,t,i}$ 为 s 季节 t 时段 i 节点 BESS 的电量; $E_{\text{sch}}^{\text{BESS},s,1,i}$ 为 s 季节 t 时段 i 节点 BESS 的初始电量; $E_{\text{max}}^{\text{BESS},i}$ 为 i 节点 BESS 的电量上限。

2.3 下层重构层

2.3.1 下层目标函数

重构层以主动配电网的有功损耗 F_{Lower} 最小为目标, 即 $\min F_{\text{Lower}}$, 为单目标优化问题, 如式(34)所示。

$$\min F_{\text{Lower}} = \sum_{s=1}^4 D_s \cdot \sum_{t=1}^{24} \sum_{ij \in N_{\text{Line}}} R_{ij} \cdot (I_{s,t,ij})^2 \quad (34)$$

式中, R_{ij} 为线路 ij 的电阻。

2.3.2 下层约束条件

1) 系统

潮流、电压、电流约束见式(26)一式(28)。

2) “网”侧

开关动作次数约束为

$$\sum_{t=1}^{24} \sum_{ij \in N_j} |\alpha_{\text{rec}}^{t,ij} - \alpha_{\text{rec}}^{t-1,ij}| \leq q_{\text{max}} \quad (35)$$

式中: q_{max} 为一天内所有开关动作次数上限; $\alpha_{\text{rec}}^{t,ij}$ 为 t 时段线路 ij 开断状态, 为 0-1 变量。

配电网辐射性、连通性约束参考文献[25]。

3 求解方法

由于建立的三层模型在求解过程中需要互相传递参数, 且上、中层为多目标优化问题, 需要从 Pareto 前沿解中获取最优折衷方案并传递给其他层, 难以转化为二阶锥规划形式^[19], 且现有文献多采用该方法处理单目标问题, 因此本文采用成熟的智能优化算法求解模型, 其中上、中层采用 INSGA2 与模糊隶属度函数结合求解, 下层采用 IGA 求解。

3.1 改进的快速非支配排序遗传算法(INSAGA2)

NSGA2 是 2002 年 Deb 等提出的一种多目标进化算法^[26], 该算法通过快速非支配排序策略、拥挤度距离策略、精英选择策略实现, 一次求解即可获得多目标优化问题的 Pareto 前沿解集, 具有高效性, 但由于初始种群随机化与超参数恒定可能导致算法陷入局部最优解与性能下降, 因此采用自适应交叉与变异概率、混沌映射策略、正态分布交叉算子对其进行改进以增强算法的空间搜索能力, 提升收敛速度。INSAGA2 求解规划层过程如附录 A 图 A1 所示。

3.1.1 自适应交叉与变异概率

根据迭代次数对交叉概率 P_c 与变异概率 P_m 进行自适应更新, 表达式如式(36)所示。

$$\left\{ \begin{array}{l} P_c = P_{c,\text{max}} - (P_{c,\text{max}} - P_{c,\text{min}}) \cdot (G_{\text{en}} / G_{\text{en},\text{max}})^2 \\ P_m = P_{m,\text{max}} - (P_{m,\text{max}} - P_{m,\text{min}}) \cdot (G_{\text{en}} / G_{\text{en},\text{max}})^2 \end{array} \right. \quad (36)$$

式中: $P_{c,\text{max}}$ 、 $P_{c,\text{min}}$ 分别为交叉概率最大、最小值, 取 0.8、0.6; $P_{m,\text{max}}$ 、 $P_{m,\text{min}}$ 分别为变异概率最大、最小值, 取 0.3、0.1; G_{en} 为当前迭代次数; $G_{\text{en},\text{max}}$ 为最大迭代次数。

3.1.2 Tent 混沌映射策略

Tent 混沌映射可以使初始化种群分布更加均匀、遍历, 一定程度上避免种群陷入早熟。先利用 Tent 映射生成[0,1]均匀随机混沌值 y , 表达式为

$$y_{i,j+1} = \begin{cases} y_{i,j}, & 0 \leq y_{i,j} < \zeta \\ \zeta, & \zeta \leq y_{i,j} \leq 1 \\ \frac{1-y_{i,j}}{1-\zeta}, & \end{cases} \quad (37)$$

式中: $y_{i,j}$ 为第 i 个个体的第 j 个决策变量的混沌值, 当 $j=1$ 时, $y_{i,1}$ 由均匀随机函数产生; 本文 ζ 取 0.5。

再将其变换到个体解空间如式(38)所示。

$$X_{i,j} = U_j + y_{i,j} \cdot (U_j - L_j), \quad i = 1, 2, 3, \dots, P_{\text{op}} \quad (38)$$

式中: X_{ij} 为第 i 个个体的第 j 个决策变量解信息; U_j 、 L_j 分别为第 j 个决策变量上、下限; P_{op} 为种群数量。

3.1.3 正态分布交叉算子

NSGA2 采用的模拟二进制交叉(simulated binary crossover, SBX)算子,易出现局部最优和进化过程不稳定等问题^[27],因此引入正态分布交叉(normal distribution crossover, NDX)算子,假定父代为 p_1 、 p_2 ,产生的子代为 x_1 、 x_2 ,对于第 j 个决策变量,表达式如下。

当 $\alpha \leq 0.5$ 时

$$\begin{cases} x_{1,j} = (p_{1,j} + p_{2,j})/2 + 1.481 \times |N(0,1)| \cdot \\ \quad (p_{1,j} - p_{2,j})/2 \\ x_{2,j} = (p_{1,j} + p_{2,j})/2 - 1.481 \times |N(0,1)| \cdot \\ \quad (p_{1,j} - p_{2,j})/2 \end{cases} \quad (39)$$

当 $\alpha > 0.5$ 时

$$\begin{cases} x_{1,j} = (p_{1,j} + p_{2,j})/2 - 1.481 \times |N(0,1)| \cdot \\ \quad (p_{1,j} - p_{2,j})/2 \\ x_{2,j} = (p_{1,j} + p_{2,j})/2 + 1.481 \times |N(0,1)| \cdot \\ \quad (p_{1,j} - p_{2,j})/2 \end{cases} \quad (40)$$

式中: α 为[0,1]之间的随机数; $N(0,1)$ 为正态分布随机变量。

3.2 改进遗传算法(IGA)

遗传算法是一种经典全局智能优化算法,但该算法采用随机初始种群,容易产生局部最优,且交叉、变异概率恒定导致算法搜索效率低,因此采用混沌映射策略以及自适应交叉、变异策略进行改进,具体表达式见式(36)~式(38)。IGA 求解重构层过程如附录 A 图 A2 所示。

3.3 三层模型求解

该三层模型通过上层规划层可以求得 DG、CB、SVC、BESS 选址定容与线路的最优规划方案;中层调度层可以求得 DG 出力、CB 投切、SVC 出力、OLTC 挡位、DR 容量、BESS 充放电功率的最优调度方案;下层重构层可以求得电网联络开关开断的最优重构方案。

三层模型求解流程如附录 A 图 A3 所示。具体步骤如下:

1) 初始化上层参数,首先采用 Tent 混沌策略生成初始规划方案,并计算投资成本;然后启动中层优化求解。

2) 初始化中层参数,首先采用 Tent 混沌策略生成初始调度方案,并计算碳排放量、电压偏移量、

调度成本;然后启动下层优化求解。

3) 初始化下层参数,首先生成各初始调度方案下所有重构方案可行解集;然后采用 Tent 混沌策略从解集中生成初始重构方案,并计算其有功损耗;其次通过选择、交叉、变异遗传操作生成子代重构方案并进行辐射性、连通性判断,计算其有功损耗;接着进行精英选择,直到满足最大迭代次数,得到有功损耗最小的最优重构方案;最后计算该重构方案下的碳排放量与重构成本;至此便得到了各初始规划方案的初始调度方案下的最优重构方案,并返回中层优化求解。

4) 通过非支配排序、拥挤度计算、选择、改进交叉、变异等操作产生子代调度方案,计算其碳排放量、电压偏移量、调度成本;然后启动下层优化求解,与步骤 3)同理,直到满足最大迭代次数,得到各子代调度方案下的最优调度方案;接着通过模糊隶属度函数求得最优折衷调度方案;最后计算该调度方案下的碳排放量与调度成本;至此便得到了各初始规划方案下的最优调度方案及重构方案,并返回上层优化求解。

5) 通过非支配排序、拥挤度计算、选择、改进交叉、变异等操作产生子代规划方案,计算其投资成本;然后启动中、下层优化求解,与步骤 3)、4)同理,直到满足最大迭代次数,得到各子代规划方案下的最优调度方案及重构方案;接着通过模糊隶属度函数求得最优折衷规划方案;最后计算该规划方案下的碳排放量与综合成本;至此便得到了最优规划方案及该方案下的最优调度方案与重构方案。

4 算例分析

4.1 参数设置

以西北某地区 2023 年小时级光照强度、风速、负荷为基础数据,处理后得到的四季 24 时段有功出力时序曲线见图 2、图 3;WG、PV、CB、SVC、BESS 相关基础参数如表 1 所示。以附录 A 图 A4 所示配电网为研究对象,基准电压为 10 kV,线路型号如表 2 所示;OLTC 设置在首端,调节范围为 [0.95, 1.05],每挡变比为 2.5%;且配电网内所有节点均设置为可转移负荷。源侧, WG、PV 每个节点安装数量上限为 3 台;弃风、弃光成本为 0.6 元/kWh,弃风弃光上下限比例均为 0.2。网侧,系统节点电压范围为 0.93~1.07 p.u.;CB 每个节点安装数量上限为 30 组,每日最大动作次数为 5 次;SVC 无功输出范围为安装容量的 -20%~100%;OLTC 每日最大动作次数为 5 次;设置最大重构时段为 4^[13]。荷侧,可转移负荷比例系数范围为 0~0.2。储侧,单台 BESS

最大连续充、放电时间为 6 h，额定容量为 600 kWh，充放电效率为 0.9，荷电状态上、下限分别为 0.9、0.2，初始荷电状态为 0.5。购电电价曲线如图 4。

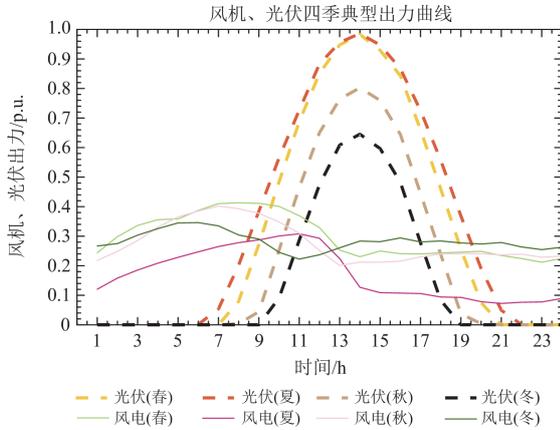


图 2 DG 出力时序曲线图

Fig. 2 Timing curve diagram of DG output

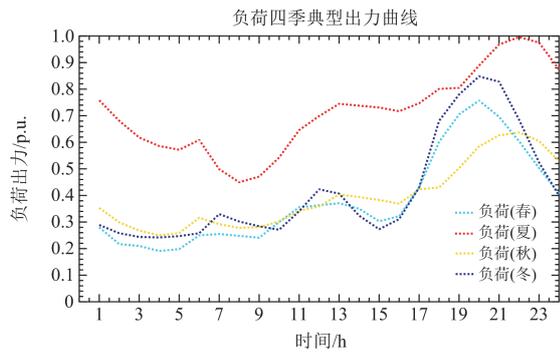


图 3 负荷出力时序曲线图

Fig. 3 Timing curve diagram of load output

表 1 设备相关基础参数

Table 1 Equipment related basic parameters

设备类型	额定功率	额定功率因数	投资成本	运维成本	规划位置数量/个
WG	180 kW/台	0.95	63 万元/台	0.35 元/kW	3
PV	140 kW/台	0.98	100 万元/台	0.35 元/kW	3
CB	10 kvar/组	—	0.06 万元/组	0.35 元/kvar	3
SVC	安装容量上限 300 kvar		250 元/kvar	0.35 元/kvar	3
BESS	100 kW/台	1.0	96 万元/台	0.35 元/kW	3

表 2 线路型号参数

Table 2 Line model parameters

线路型号	阻抗/(Ω/km)	安全电流/A	投资费用/(万元/km)
1	0.46 + j0.31	235	1.44
2	0.33 + j0.38	345	2.34
3	0.28 + j0.385	460	3.60

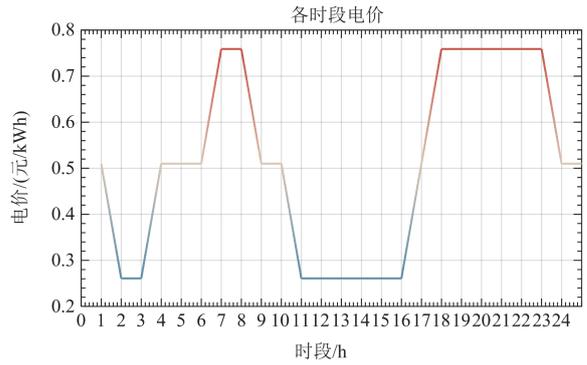


图 4 购电电价曲线图

Fig. 4 Electricity purchase price curve diagram

4.2 结果分析

为验证所提模型的有效性，设置以下规划方案进行对比。

方案 1：本文所提模型；

方案 2：在方案 1 的基础上不考虑经济性；

方案 3：在方案 1 的基础上不考虑低碳性；

方案 4：在方案 1 的基础上不考虑网侧重构；

方案 5：在方案 1 的基础上不考虑 BESS、DR、无功补偿、网侧重构。

4.2.1 所建模型的必要性分析

方案 1、2、3 从碳、电两个视角出发对比分析双碳政策与经济不同导向下的规划结果，验证所提模型必要性；方案 1、4、5 从多主体视角出发对比分析考虑主动管理措施下的规划结果，验证储能规划、需求响应、无功补偿、网架重构等措施的必要性。

本文模型配电网规划结果如表 3 所示，调度成本、重构成本、开关重构结果分别如表 4—表 6 所示。

根据表 3—表 6，分析本文模型规划结果可知：系统碳排放量为 9872.29 t，综合成本为 1030.87 万元。

在源侧，DG 总渗透率为 44.15%，总消纳率达到 95.02%，WG 在 4 个季节的消纳率分别为 94.92%、

表 3 本文模型配电网规划结果

Table 3 Distribution network planning results of the proposed model

规划内容	规划结果	折算年投资费用/万元	总投资费用/万元
WG 选址(数量)	22(2)、30(1)、31(3)	29.57	
PV 选址(数量)	6(1)、26(2)、29(1)	31.29	
线路(型号)	1-2(2)、2-3(2)、3-4(2)	0.31	
CB 选址(数量)	5(8)、7(5)、9(25)	0.18	100.30
SVC 选址(容量)	11(234)、27(267)、30(215)	1.40	
BESS 选址(数量)	12(2)、14(2)、30(1)	37.55	

表 4 本文模型配电网规划方案的调度成本

Table 4 Scheduling cost of the proposed model distribution network planning scheme

调度成本/万元										总调度成本/万元
WG	PV	弃风	弃光	线路	CB	SVC	OLTC	BESS		
62.33	53.45	6.82	5.85	7.33	75.14	117.45	1.10	17.71		347.17

表 5 本文模型配电网规划方案的重构成本

Table 5 Reconfiguration cost of the proposed model distribution network planning scheme

重构成本/万元		总重构成本/万元
购电	开关	
582.60	0.80	583.40

表 6 本文模型开关重构结果

Table 6 Reconstruction results of the proposed model switch

季节	时段	断开开关	重构成本/万元	降低有功损耗/MW
春	[1,6]	9-10、25-26、32-33、 8-21、12-22	0.80	34.27
	[7,11]	5-6、9-10、25-26、 30-31、12-22		
	[12,18]	5-6、12-13、12-22、 18-33、25-29		
	[19,24]	5-6、9-10、12-13、 30-31、25-29		
夏	[1,5]	10-11、13-14、7-8、 30-31、25-29	0.80	34.27
	[6,11]	4-5、10-11、13-14、 25-26、30-31		
	[12,17]	4-5、7-8、13-14、17-18、21-22		
秋	[18,24]	7-8、10-11、13-14、 18-33、25-29	0.80	34.27
	[1,8]	4-5、11-12、14-15、 25-26、30-31		
	[9,15]	9-10、14-15、7-8、 30-31、25-29		
	[16,20]	7-8、14-15、21-22、 25-26、30-31		
冬	[21,24]	7-8、11-12、30-31、 12-22、25-29	0.80	34.27
	[1,4]	7-8、9-10、21-22、 28-29、30-31		
	[5,10]	8-21、12-22、18-33、 30-31、11-12		
	[11,16]	13-14、8-21、12-22、 18-33、25-29		
	[17,24]	7-8、13-14、28-29、 31-32、8-21		

96.06%、93.96%、95.13%，PV 在 4 个季节的消纳率分别为 94.61%、95.06%、95.75%、95.39%，弃风、弃光费用分别为 6.82 万元、5.85 万元，其中弃风情况多发生于风机出力高峰时段与负荷低谷时段，而弃光情况则多发生于光伏出力高峰时段，这是由于该时段光伏出力与负荷需求不一致，负荷需求小，光伏出力大。以节点 22 的 WG、节点 6 的 PV 为例，弃风、弃光情况分别如图 5、图 6 所示。

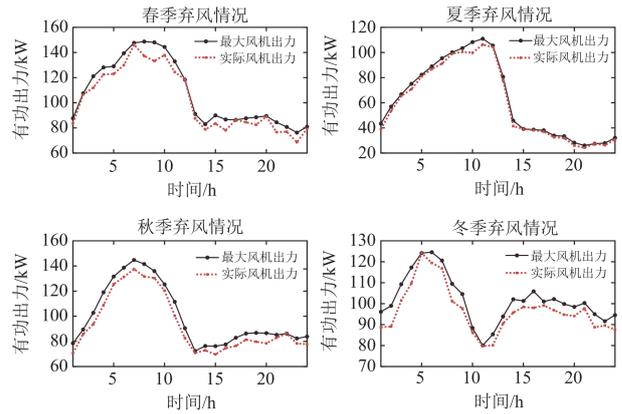


图 5 节点 22 风机弃风情况

Fig. 5 Wind abandonment of node-22 wind turbine

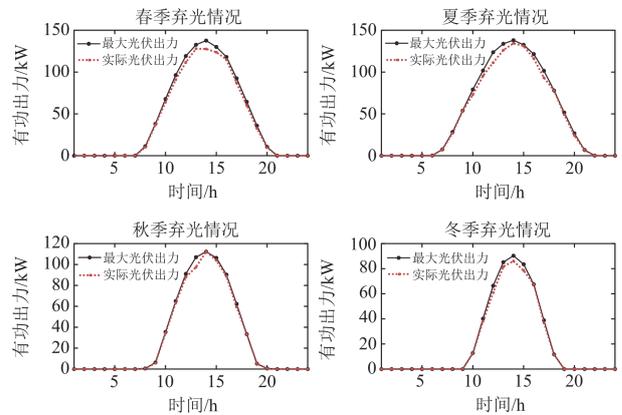


图 6 节点 6 光伏弃光情况

Fig. 6 Solar abandonment of node-6 photovoltaic

在网侧，以节点 9 的 CB、节点 27 的 SVC 为例，无功调度情况如图 7 所示。总体来看，负荷低谷时无功补偿较少，负荷高峰时较多。夏季节点 27 的 SVC 全天满额出力，这是由于夏季负荷需求大，而无功补偿能够起到一定的电压抬升作用，但该节点的 SVC 总装机容量较小，因此满额出力。

在荷侧，负荷转移情况如图 8 所示，原始负荷具有较大的峰谷差，最大为 2251.29 kW，实施 DR 后高峰负荷减少，低谷负荷增加，有效改善了峰谷差，变为 1928.53 kW，降低了 14.34%，使负荷波动平缓。

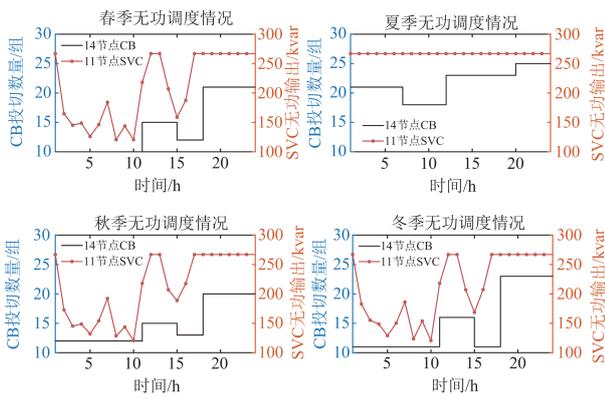


图 7 无功调度情况

Fig. 7 Reactive power scheduling situation

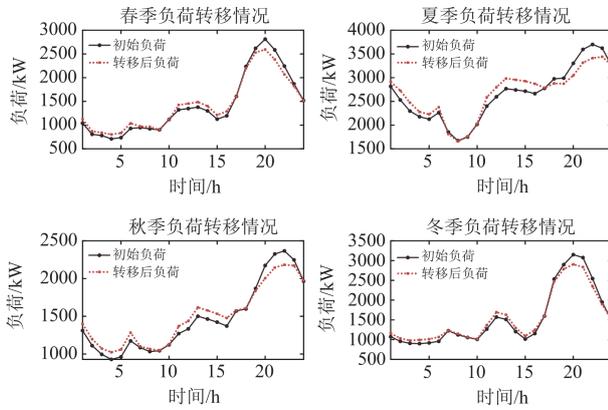


图 8 负荷转移情况

Fig. 8 Load transfer situation

在储能侧，以节点 12 的 BESS 为例，充放电情况如图 9 所示，正值表示充电，负值表示放电，BESS 基本在负荷低谷时充电，在负荷高峰时放电，起到一定的削峰填谷作用。以春季储能为例进行分析：02:00—04:00 储能处于充电状态，此时电价较低，且负荷水平较低，PV 出力几乎为 0，储能消纳一定的 WG 出力；04:00—10:00 储能处于不充不放状态，此时电价处于正常电价，负荷水平相对稍微升高，PV 出力较低，负荷基本由 WG 出力与上级电网满足；11:00—18:00 储能处于充电状态，这是由于此时电价较低，且虽然 WG 出力减少，但 PV 出力较高；18:00—24:00 储能处于放电状态，这是由于此时不仅电价与负荷水平均较高，且 PV 出力很低，WG 出力减少，负荷基本由储能与上级电网满足；24:00—次日 01:00 储能处于充电状态，这是由于要满足储能电量约束。

DR 与 BESS 共同作用下总负荷的“削峰填谷”情况如图 10 所示。分析可知：DR 与 BESS 在分时电价的引导下，负荷峰谷差由初始的 2251.29 kW 减

少到 1723.35 kW，降低 23.45%，且相比仅 DR 作用减少 205.18 kW，降低 10.64%，说明两者相互配合能起到更好的“削峰填谷”效果。

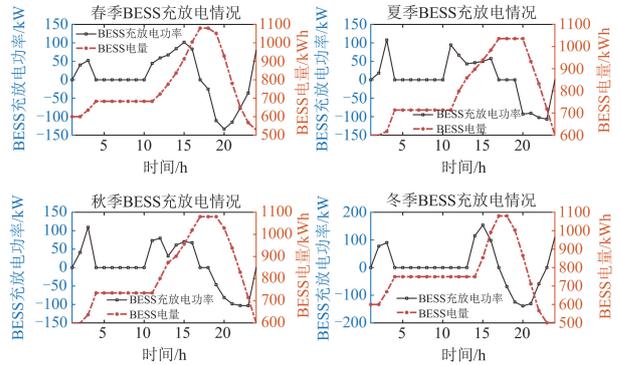


图 9 节点 12 的储能充放电情况

Fig. 9 Energy storage charging and discharging situation of node 12

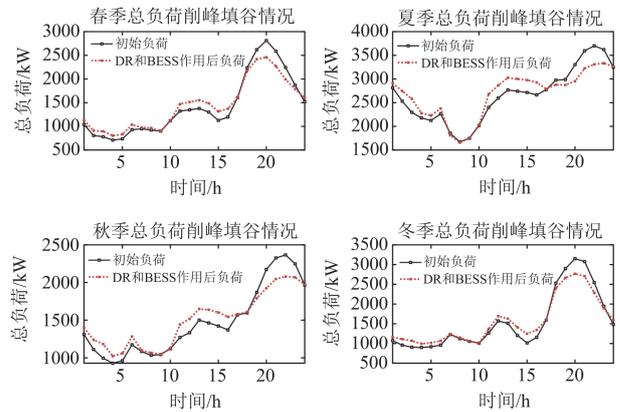


图 10 总负荷的削峰填谷情况

Fig. 10 Peak shaving and valley filling of total load

各方案的碳排放量与综合成本、规划结果分别如表 7、表 8 所示。

对比方案 1、2 结果可知，在低碳性方面：无功规划几乎不变，这是由于碳排放量主要与有功出力相关，且中层考虑了电压质量，而无功补偿具有抬升电压的作用。方案 2 的 DG 总渗透率为 77.52%，总消纳率为 90.48%，WG 消纳率分别为 88.19%、89.62%、88.08%、88.05%，PV 消纳率分别为 87.43%、88.40%、87.90%、87.07%，这是由于方案 2 仅考虑碳排放量最低，即从上级火电厂购电量最少，而 DG 属于绿电，会尽可能多的安装，且规划时为了尽可能消纳绿电以减少弃风弃光现象，导致储能安装数量也会增加，但由于风机光伏安装数量较多，使得部分时段出力过多，虽然储能有一定的消纳能力，然而受限于其容量规模与技术特性，仍会造成弃风、弃光量的增加，最终导致综合成本增加，因此方案

2 相比方案 1 碳排放量减少了 22.49%，但 DG 消纳率反而降低，出现明显弃风弃光现象，且综合成本增加了 13.74%。

表 7 各方案下配电网规划结果的碳排放量与综合成本

Table 7 Carbon emissions and comprehensive costs of distribution network planning results under various schemes

方案	碳排放量/t	综合成本/万元
1	9872.29	1030.87
2	7675.79	1195.05
3	10 702.15	1012.32
4	9902.77	1047.55
5	11 558.23	1043.18

表 8 各方案配电网规划结果

Table 8 Distribution network planning results of various schemes

方案	规划内容	规划结果
2	WG 选址(数量)	22(3)、30(3)、31(3)
	PV 选址(数量)	6(3)、26(3)、29(3)
	线路(型号)	1-2(2)、2-3(2)、3-4(2)
	CB 选址(数量)	5(8)、7(5)、9(25)
	SVC 选址(容量)	11(234)、27(267)、30(215)
	BESS 选址(数量)	12(3)、14(3)、30(3)
3	WG 选址(数量)	22(1)、30(1)、31(1)
	PV 选址(数量)	6(1)、26(1)、29(1)
	线路(型号)	1-2(2)、2-3(2)、3-4(2)
	CB 选址(数量)	5(8)、7(5)、9(25)
	SVC 选址(容量)	11(234)、27(267)、30(215)
	BESS 选址(数量)	12(1)、14(1)、30(1)
4	WG 选址(数量)	22(2)、30(1)、31(3)
	PV 选址(数量)	6(1)、26(2)、29(1)
	线路(型号)	1-2(2)、2-3(2)、3-4(2)
	CB 选址(数量)	5(8)、7(5)、9(25)
	SVC 选址(容量)	11(234)、27(267)、30(215)
	BESS 选址(数量)	12(2)、14(2)、30(1)
5	WG 选址(数量)	22(2)、30(1)
	PV 选址(数量)	6(1)、29(1)
	线路(型号)	1-2(3)、2-3(3)、3-4(2)、4-5(2)、5-6(2)
	CB 选址(数量)	—
	SVC 选址(容量)	—
	BESS 选址(数量)	—

对比方案 1、3 结果可知，在经济性方面：方案 3 的 DG 总渗透率为 8.62%，但总消纳率为 100%，这是由于方案 3 仅考虑综合成本最低，而 DG、BESS 的成本相对较高，使得 DG、BESS 的投资相对减少，从而新能源出力减少，几乎可以实现全额消纳，但需从上级电网购买更多电量，因此方案 3 相比方案 1 综合成本降低了 1.80%，但碳排放量增加了 7.75%。综上，本文模型同时兼顾碳排放量与综合成本，更符合“既要金山银山，也要绿水青山”理念。

对比方案 1、4 结果可知，重构之后虽然开关动作成本增加 0.80 万元，但全年配电网有功损耗减少了 34.27 MW，折算收益约为 17.48 万元，且碳排放量减少了约 30.48 t，电压偏移量由 2405.23 p.u. 减小至 2039.40 p.u.，提高了配电网运行的低碳性、优质性和经济性。

对比方案 1、5 结果可知，方案 1 线路升级数量减少了 2 条，这是由于方案 5 未考虑 BESS 规划以及 DR，导致负荷削峰填谷效果大幅降低，从上级电网购电量增加，靠近电源线路传输功率增大，且无法体现 BESS 延缓电网设备升级的作用；由于方案 1 考虑 BESS 以及无功规划，年投资成本增加了 69.21 万元，但调度成本与重构成本降低了 81.52 万元，因此综合成本减少，且碳排放量减少 14.59%，由于具有无功补偿装置，电压质量效果也更好。

表 9 为方案 1、4、5 电压质量对比情况。分析可知，方案 1 电压波动范围更小，且电压偏移量最低，电压波动上限较高是由于夏季负荷需求较大，OLTC 多处于 1.05 p.u. 位置，导致夏季 2 节点电压相对较高，其他季节负荷相对夏季较低，多处于 1.025 p.u. 位置。方案 4 由于少考虑一种主动管理措施，效果偏低；而方案 5 未考虑无功调压手段，因此效果最差。方案 1 四季各时段各节点电压如图 11 所示。

表 9 各方案电压质量对比情况

Table 9 Comparison of voltage quality of various schemes

方案	电压偏移量/p.u.	电压波动范围/p.u.
1	2039.40	0.978~1.048
4	2405.23	0.966~1.048
5	3452.64	0.940~1.048

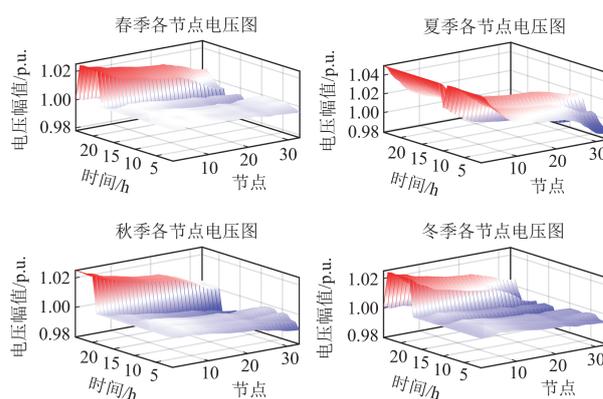


图 11 方案 1 四季各时段各节点电压

Fig. 11 Voltage of each node in each period in four seasons of scheme 1

4.2.2 求解方法的有效性分析

为验证所提求解方法的有效性与改进后相比原

算法的优越性, 设置上、中层采用 NSGA2, 下层采用 GA 对本文所提模型进行求解, 与本文所提改进方法对比。上层 Pareto 前沿对比如图 12 所示, 下层最优解迭代曲线对比如图 13 所示。

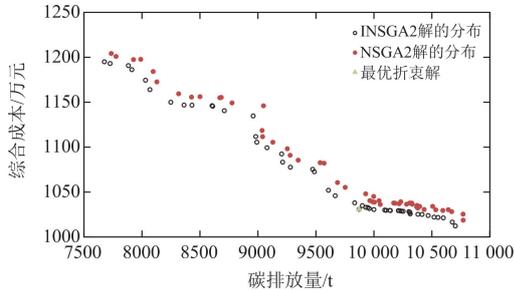


图 12 上层 Pareto 前沿对比图

Fig. 12 Upper Pareto frontier comparison diagram

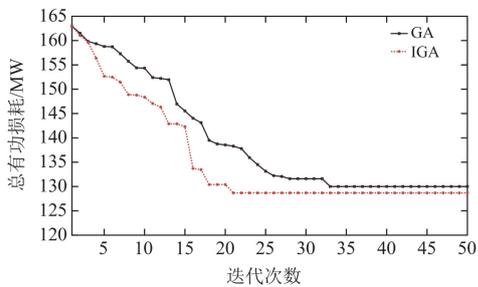


图 13 下层最优解迭代曲线对比图

Fig. 13 Lower optimal solution iterative curve comparison diagram

分析可知, INSGA2 的 Pareto 前沿解分布均匀, 而且解的质量相对更好; IGA 第 21 次迭代便达到了最优解, 相比 GA 第 33 次迭代获得最优解, 不仅收敛次数减少 12 次, 收敛速度更快, 而且收敛效果更好。

5 结论

提出了一种计及低碳与经济的配电网源-网-荷-储协同规划运行模型, 通过仿真算例对模型及求解方法进行验证, 得到以下结论:

- 1) 提出的配电网源-网-荷-储协同规划方法从系统整体角度出发, 兼顾低碳性、经济性, 在保证配电网优质经济运行基础上促进新能源消纳, 向低碳转变, 符合电网发展趋势, 提升配电网规划水平。
- 2) 在规划模型中考虑源侧与储侧灵活性资源、网侧主动管理措施、荷侧需求响应, 规划-运行联合优化, 促进配电网低碳、经济、优质运行。
- 3) 提出的 IGA 算法与 INSGA2 算法对三层模型进行混合求解, 有效提升求解效率与求解质量。

本文所提模型只考虑了分布式电源中光伏与风机, 未考虑燃料电池等形式的分布式电源以及充电桩等柔性负荷; 且改进后的求解方法虽然效果有所提升, 但耗时依旧过长。后续将在本文基础上研究相关内容。

附录 A

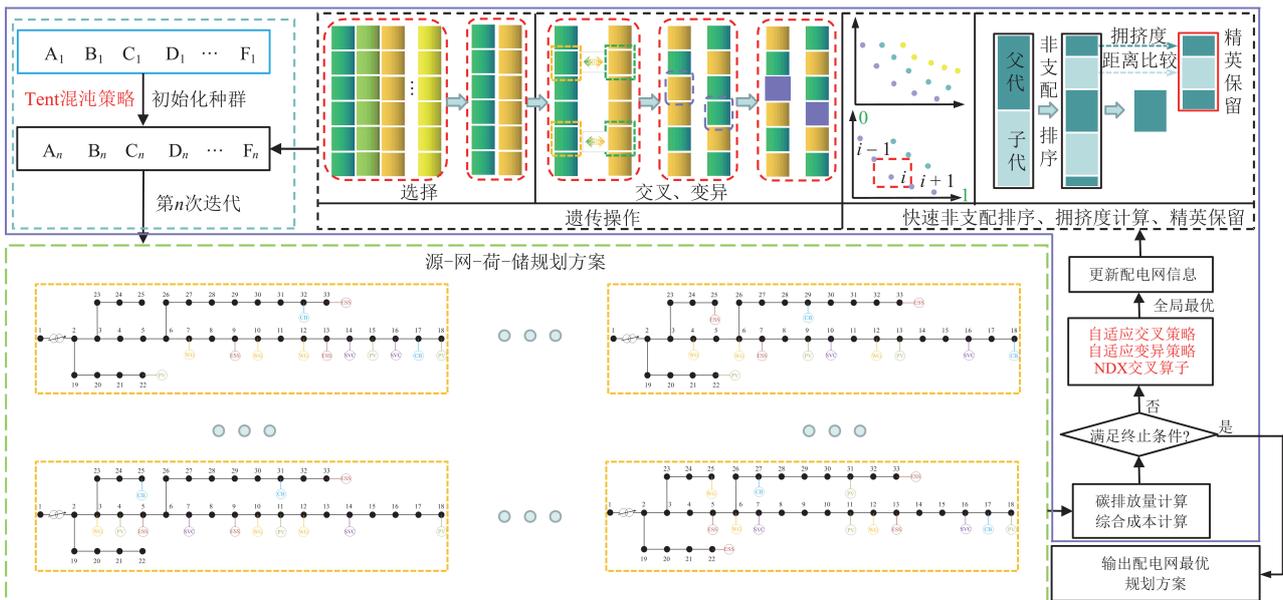


图 A1 INSGA2 求解规划层过程图

Fig. A1 Process diagram of INSGA2 solving the planning layer

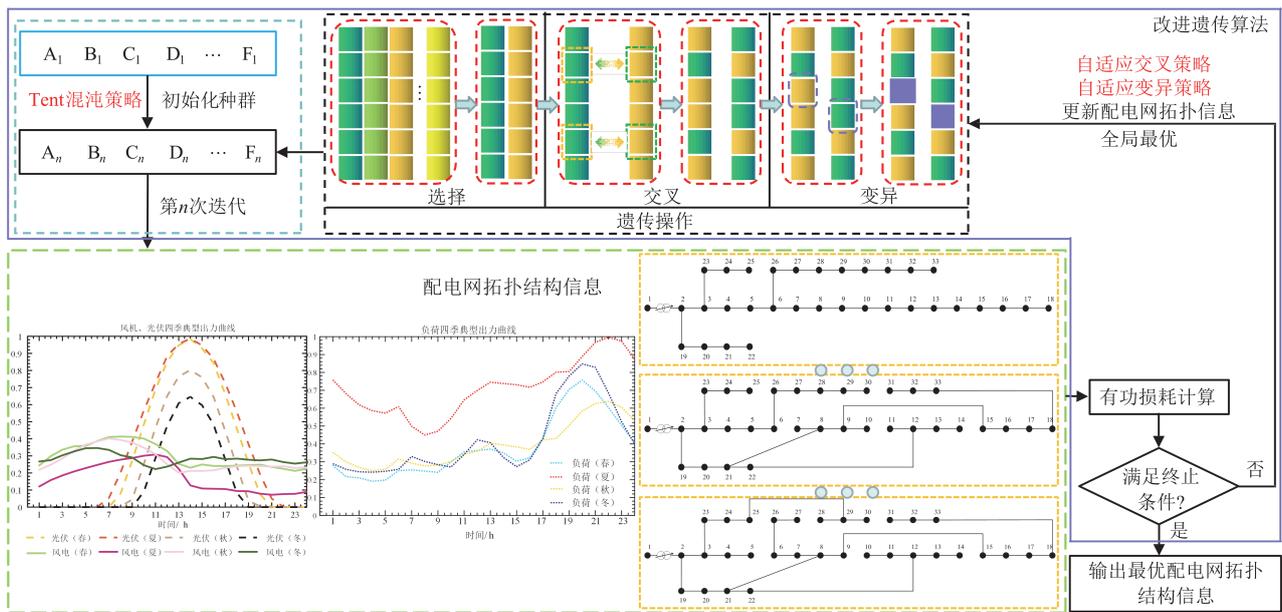


图 A2 IGA 求解重构层过程图

Fig. A2 Process diagram of IGA solving the reconstruction layer

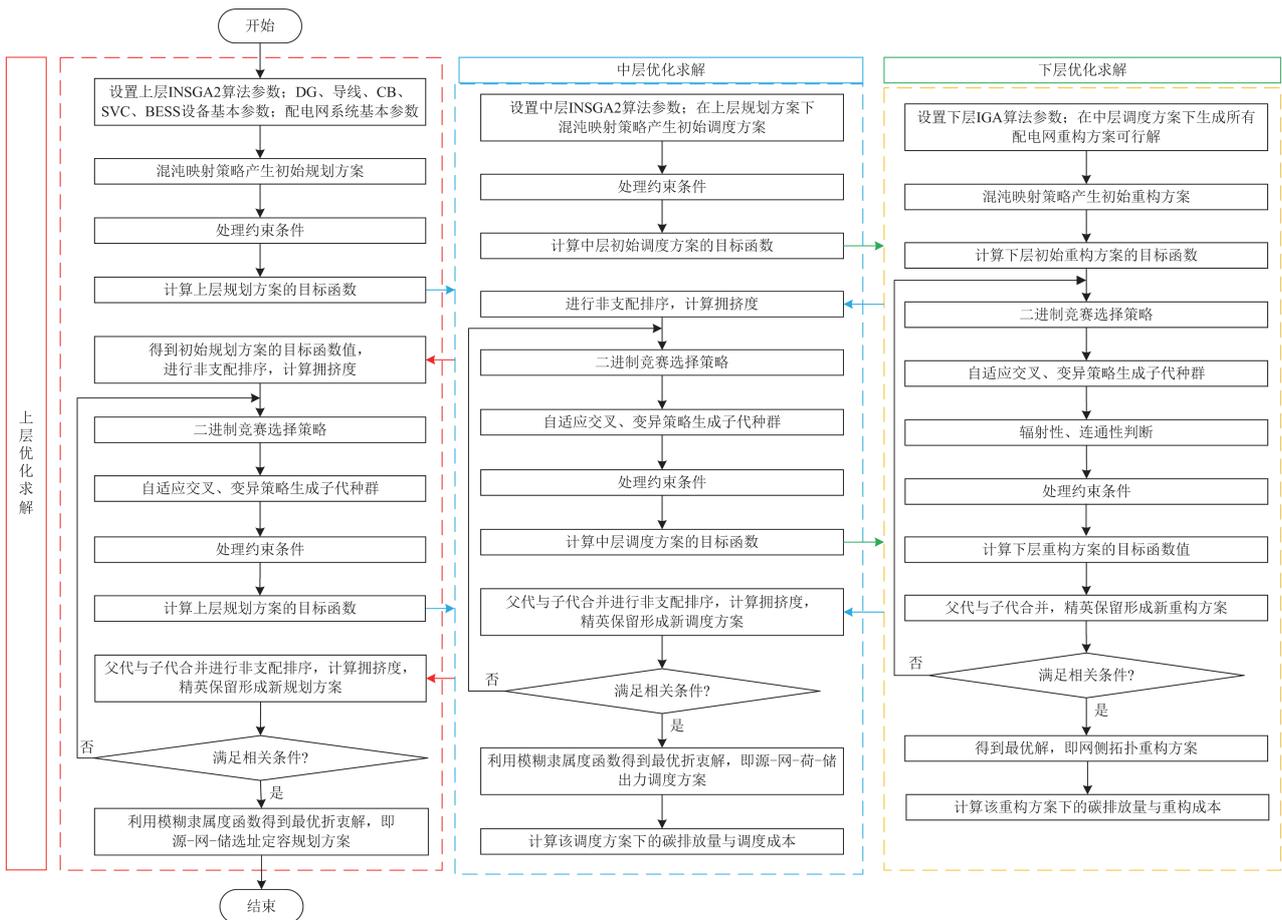


图 A3 配电网源-网-荷-储协同规划流程图

Fig. A3 Flow chart of distribution network source-network-load-storage collaborative planning

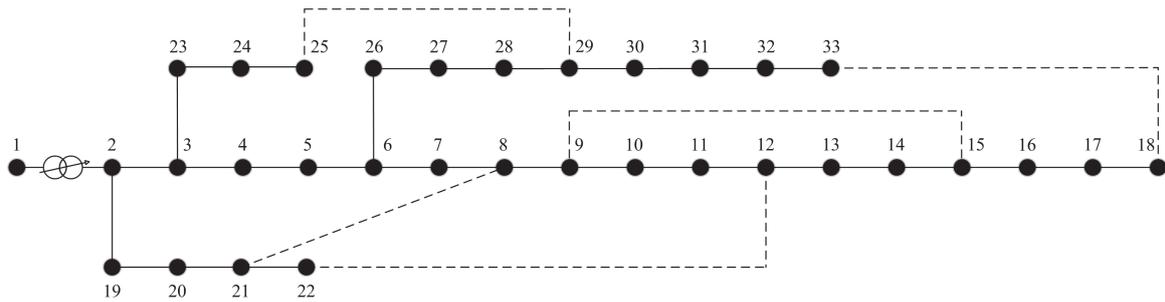


图 A4 改进 IEEE 33 节点配电网拓扑图

Fig. A4 Topology diagram of improved IEEE 33 node distribution network

参考文献

- [1] 范馨予, 黄媛, 吴疆, 等. 考虑源网荷储协同优化的配电网韧性提升策略[J]. 电力建设, 2023, 44(4): 63-73.
FAN Xinyu, HUANG Yuan, WU Jiang, et al. Resilience promotion strategy for distribution network considering source-network-load-storage coordination[J]. Electric Power Construction, 2023, 44(4): 63-73.
- [2] 刘金森, 罗宁, 王杰, 等. 基于海量场景降维的配电网源网荷储协同规划[J]. 中国电力, 2022, 55(12): 78-85.
LIU Jinsen, LUO Ning, WANG Jie, et al. Massive scenario reduction based distribution-level power system planning considering the coordination of source, network, load and storage[J]. Electric Power, 2022, 55(12): 78-85.
- [3] 王杰, 王维庆, 王海云, 等. 考虑越限风险的主动配电网中 DG、SOP 与 ESS 的两阶段协调规划[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(24): 71-82.
WANG Jie, WANG Weiqing, WANG Haiyun, et al. Two-stage coordinated planning of DG, SOP and ESS in an active distribution network considering violation risk[J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(24): 71-82.
- [4] 杨晓辉, 邓福伟, 张钟炼, 等. 基于自适应 ϵ 约束法考虑 OLTC 模糊控制的低碳配电网双层规划[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(13): 1-11.
YANG Xiaohui, DENG Fuwei, ZHANG Zhonglian, et al. Bi-level planning for low-carbon distribution networks based on an adaptive ϵ -constraint method considering OLTC fuzzy control[J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(13): 1-11.
- [5] 米阳, 申杰, 卢长坤, 等. 考虑含储能的三端智能软开关与需求侧响应的主动配电网有功无功协调优化[J]. 电力系统保护与控制, 2024, 52(3): 104-118.
MI Yang, SHEN Jie, LU Changkun, et al. Active and reactive power coordination optimization of an active distribution network considering a three-terminal soft open point with energy storage and demand response[J]. Power System Protection and Control, 2024, 52(3): 104-118.
- [6] 韩肖清, 李廷钧, 张东霞, 等. 双碳目标下的新型电力系统规划新问题及关键技术[J]. 高电压技术, 2021, 47(9): 3036-3046.
HAN Xiaoqing, LI Tingjun, ZHANG Dongxia, et al. New issues and key technologies of new power system planning under double carbon goals[J]. High Voltage Engineering, 2021, 47(9): 3036-3046.
- [7] 胡晶, 陈红坤, 陈磊, 等. 考虑多主体利益与需求响应的分布式电源优化配置[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(15): 38-46.
HU Jing, CHEN Hongkun, CHEN Lei, et al. Distributed generation planning in an active distribution network considering multi-agent interests and demand response[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(15): 38-46.
- [8] 路亮, 魏明奎, 张怀远, 等. 计及静态电压稳定性的风光电站选址定容协同规划方法[J]. 电力自动化设备, 2024, 44(1): 95-102.
LU Liang, WEI Mingkui, ZHANG Huaiyuan, et al. Coordinated siting and sizing planning method of wind and photovoltaic power stations considering static voltage[J]. Electric Power Automation Equipment, 2024, 44(1): 95-102.
- [9] 李扬, 冯博, 李国庆, 等. 计及储能接入影响的主动配电网分布式电源双层规划[J]. 太阳能学报, 2017, 38(12): 3311-3318.
LI Yang, FENG Bo, LI Guoqing, et al. Bi-level programming of distributed generation in active distribution network considering integration influence of energy storage system[J]. Acta Energetica Solaris Sinica, 2017, 38(12): 3311-3318.
- [10] 高红均, 刘俊勇. 考虑不同类型 DG 和负荷建模的主动配电网协同规划[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(18): 4911-4922.
GAO Hongjun, LIU Junyong. Coordinated planning considering different types of DG and load in active distribution network[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(18): 4911-4922.
- [11] 王守相, 王瀚樟, 赵倩宇, 等. 面向配电网光伏接纳能力提升的分时电价优化方法[J]. 电力系统自动化, 2023, 47(10): 38-46.
WANG Shouxiang, WANG Hanzhang, ZHAO Qianyu, et al. Optimization method of time-of-use electricity price for improving photovoltaic hosting capacity of distribution network[J]. Automation of Electric Power Systems, 2023, 47(10): 38-46.
- [12] 李逐云, 雷霞, 邱少引, 等. 考虑“源-网-荷”三方利益的主动配电网协调规划[J]. 电网技术, 2017, 41(2), 378-387.
LI Zhuyun, LEI Xia, QIU Shaoyin, et al. Coordinated planning of active distribution network considering “source-grid-load” benefits[J]. Power System Technology, 2017, 41(2): 378-387.
- [13] 张沈习, 袁加妍, 程浩忠, 等. 主动配电网中考虑需求侧管理和网络重构的分布式电源规划方法[J]. 中国电

- 机工程学报, 2016, 36(增刊 1): 1-9.
ZHANG Shenxi, YUAN Jiayan, CHENG Haozhong, et al. Optimal distributed generation planning in active distribution network considering demand side management and network reconfiguration[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(S1): 1-9.
- [14] 吴志, 刘亚斐, 顾伟, 等. 基于改进 Benders 分解的储能、分布式电源与配电网多阶段规划[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(16): 4705-4715.
WU Zhi, LIU Yafei, GU Wei, et al. A modified decomposition method for multistage planning of energy storage, distributed generation and distribution network[J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(16): 4705-4715.
- [15] 李秀磊, 耿光飞, 季玉琦, 等. 主动配电网中储能和需求侧响应的联合优化规划[J]. 电网技术, 2016, 40(12): 3803-3810.
LI Xiulei, GENG Guangfei, JI Yuqi, et al. Integrated optimal planning of energy storage and demand side response in active power distribution network[J]. Power System Technology, 2016, 40(12): 3803-3810.
- [16] 傅长熠, 杨镜非, 顾家辉. 基于双层动态时段划分的配电网重构[J]. 电力自动化设备, 2022, 42(6): 30-36, 52.
FU Changyi, YANG Jingfei, GU Jiahui. Coordinative planning of distribution network and multiple integrated energy systems based on Stackelberg game[J]. Electric Power Automation Equipment, 2022, 42(6): 30-36, 52.
- [17] 魏旭, 刘东, 高飞, 等. 双碳目标下考虑源网荷储协同优化运行的新型电力系统发电规划[J]. 电网技术, 2023, 47(9): 3648-3661.
WEI Xu, LIU Dong, GAO Fei, et al. Generation expansion planning of new power system considering collaborative optimal operation of source-grid-load-storage under carbon peaking and carbon neutrality[J]. Power System Technology, 2023, 47(9): 3648-3661.
- [18] 米阳, 陈宇阳, 陈博洋, 等. 考虑微能网接入主动配电网的共享储能多目标配置[J]. 上海交通大学学报, 2024, 58(9): 1309-1322.
MI Yang, CHEN Yuyang, CHEN Boyang, et al. Shared energy storage multi-objective allocation strategy considering integrated energy microgrid access to active distribution network[J]. Journal of Shanghai Jiaotong University, 2024, 58(9): 1309-1322.
- [19] 张忠会, 雷大勇, 李俊, 等. 基于自适应 ϵ -支配多目标粒子群算法的含 SOP 的主动配电网源-网-荷-储双层协同规划模型[J]. 电网技术, 2022, 46(6): 2199-2212.
ZHANG Zhonghui, LEI Dayong, LI Jun, et al. Source-network-load-storage bi-level collaborative planning model of active distribution network with SOP based on adaptive ϵ -dominating multi-objective particle swarm optimization algorithm[J]. Power System Technology, 2022, 46(6): 2199-2212.
- [20] 张忠会, 雷大勇, 蒋昌辉, 等. 基于二阶锥规划和 NNC 法的交直流混合配电网双层规划模型及其求解方法[J]. 中国电机工程学报, 2023, 43(1): 70-85.
ZHANG Zhonghui, LEI Dayong, JIANG Changhui, et al. A bi-level planning model and its solution method of AC/DC hybrid distribution network based on second-order cone programming and NNC method[J]. Proceedings of the CSEE, 2023, 43(1): 70-85.
- [21] 孙乾, 许珊, 朱姝豫, 等. 考虑 DG 时序特性及 EV 时空特性的配电网规划[J]. 电力自动化设备, 2020, 40(10): 30-38.
SUN Qian, XU Shan, ZHU Shuyu, et al. Distribution network planning considering DG timing characteristics and EV spatiotemporal characteristics[J]. Electric Power Automation Equipment, 2020, 40(10): 30-38.
- [22] 张沈习, 程浩忠, 邢海军, 等. 配电网中考虑不确定性的分布式电源规划研究综述[J]. 电力自动化设备, 2016, 36(8): 1-9.
ZHANG Shenxi, CHENG Haozhong, XING Haijun, et al. Review of DG planning considering uncertainties for distribution network[J]. Electric Power Automation Equipment, 2016, 36(8): 1-9.
- [23] 丁明, 解蛟龙, 潘浩, 等. 微电网经济运行中的典型时序场景分析方法[J]. 电力自动化设备, 2017, 37(4): 11-16.
DING Ming, XIE Jiaolong, PAN Hao, et al. Typical sequential scenario analysis method for economic operation of microgrid[J]. Electric Power Automation Equipment, 2017, 37(4): 11-16.
- [24] 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.
- [25] 麻秀范, 丁宁, 李龙. 配电网重构中网络辐射形与连通性的判断[J]. 电工技术学报, 2014, 29(8): 289-293.
MA Xiufan, DING Ning, LI Long. Judging radial and connectivity of network in distribution networks reconfiguration[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2014, 29(8): 289-293.
- [26] DEB K, AGRAWAL S, PRATAP A, et al. A fast and elitist multi-objective genetic algorithm: NSGA-II[J]. IEEE Transactions on Evolutionary Computation, 2002, 6(2): 182-197.
- [27] 姜惠兰, 安星, 王亚微, 等. 基于改进 NSGA2 算法的考虑风机接入电能质量的多目标电网规划[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(21): 5405-5411.
JIANG Huilan, AN Xing, WANG Yawei, et al. Improved NSGA2 algorithm based multi-objective planning of power grid with wind farm considering power quality[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(21): 5405-5411.

收稿日期: 2024-04-06; 修回日期: 2024-08-13

作者简介:

陈鑫(1997—), 男, 硕士研究生, 研究方向为配电网规划与运行; E-mail: 1281013192@qq.com

王果(1977—), 女, 通信作者, 教授, 博士生导师, 研究方向为电能质量分析与控制、电力电子技术及其应用、电力设备在线监测技术; E-mail: wangguo@lzjtu.edu.cn

闵永智(1975—), 男, 教授, 博士生导师, 研究方向为配电网规划、深度学习、图像处理。E-mail: Minyongzhi@mail.lzjtu.cn

(编辑 魏小丽)