

面向新型电力系统的多元协调规划模型构建方法

高 鑫¹, 金 鑫², 赵 彤², 梅 峥², 魏健东², 李孟帅²

(1. 国家电网西北分部数字化处, 西安 710048; 2. 北京科东电力控制系统有限责任公司信息化研发中心, 北京 100192)

摘要: 为获取相对可控的电力输出额,并确保电力系统的安全稳定高效运行,基于多元接入的发展趋势与电碳耦合的发展路径,结合系统需求预测、电力电量平衡和可再生能源配额等,提出一种多元协调规划模型的构建方法。模拟实验证明,建立的模型可以测算电碳成本,规划结果可以用于缓解电力资源和负载需求之间的不一致性问题,为后续增加清洁能源的安装比例、减少碳排、优化电力结构提供理论参考。

关键词: 新型电力系统; 新能源; 多元协调; 电力规划模型

中图分类号: TP715 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-1807(2024)05-0120-05

2022 年,国家多部门围绕“电碳耦合”概念,提出从“电力调节”转向“电碳调节”的需求侧响应。电碳耦合的重点在于控制碳排放,合理规划新能源。伴随相关技术的不断发展,新能源应用有望在未来成为减少碳排放的重要手段。新能源发展迅速,但目前仍有一些挑战需要克服。一是可再生能源的可靠性和稳定性相对较低;二是新能源的储存能力也相对较差,在电力需求旺盛时可能会出现供不应求的情况。从电网角度来看,通过加强可再生能源的研发和应用,整合包括电源、电网、负荷和储能,即“源、网、荷、储”在内的规划方案,可以实现电力系统的整体协调和优化。

已有学者研究了现阶段在电力领域荷储结合的需求响应规划模型。鲁小秋等^[1]考虑分布式光伏接入对配电网规划评价的影响,基于传统配电网的规划评价体系,提出一种计及光伏输出功率随机性和相关性的有源配电网规划评价方法;游大宁等^[2]提出一种源网荷储多元协同调度体系,通过建立适应电源侧、电网侧、负荷侧各类资源参与的电力市场机制和多类资源协作互动调控平台;Moradi-Sepahvand 和 Amraee^[3]为了应对新能源的间歇性和不确定性,建立了一个将电池储能(battery energy storage, BES)视为灵活资源的发电-传输协调规划模型;Mao 等^[4]提出了一个考虑储能系统的负荷扩展模型,并评估了该模型在分布式电力系统中降

低碳排的效果;Zhou 等^[5]提出了一种新的风力发电和储能相结合的协调规划方法;Flores-Quiroz 和 Kai^[6]提出了一种考虑到短期约束和长期不确定性的集成发电、传输和储能规划模型,该模型结合列生成算法和共享算法,提高了运算速度;董治新等^[7]对源网荷储互动模式下的电力资源特性进行分析,总结多元主体的交易特性;李强等^[8]构建源网荷储关键单元的数学模型,分析发电系统的响应特性,基于频率判断提出源网荷储协调控制策略。

尽管已经进行了大量关于电力系统规划模型的研究,但多数文献没有同时考虑新能源消费责任和碳排因素权重。因此,本文在新型电力系统背景下,设计基于源网荷储一体化模式的协调规划模型,结合国家政策与现阶段行业研究成果,引入智能化决策,规划供电端的相关配置,以获取相对可控的电力输出,提高电力系统的安全性、稳定性和经济性。

1 考虑结合源网荷储的协调模式

1.1 计算新能源需求和限额

在“双碳”目标下,制定科学合理的新能源限额需要分析掌握地区新能源发展的总体规模、新能源消费的权重责任和能源消耗结构。

考虑到地区风力发电和光伏行业的资源禀赋、地方政府分配的新能源消费责任权重、发展规律、技术成熟度和其他因素,可以推出 2025 年风力发电

收稿日期: 2023-12-07

作者简介: 高鑫(1975—),男,陕西西安人,硕士,高级工程师,研究方向为电力控制系统自动化建设与运营管理;金鑫(1981—),男,安徽滁州人,硕士,工程师,研究方向为电力调度自动化;通信作者赵彤(1997—),女,天津人,硕士,工程师,研究方向为电力系统与人工智能;梅峥(1975—),男,北京人,博士,高级工程师,研究方向为电力调度自动化;魏健东(1992—),男,北京人,工程师,研究方向为电力系统自动化;李孟帅(1992—),男,北京人,硕士,工程师,研究方向为电力系统自动化。

和光伏发电等的发展负荷。假设该地区的可再生能源主要由风力发电、光伏和水电组成,风力发电、光伏和水电最大装机容量的计算模型为

$$\sum_{t=1}^T (h_t^{pu} H_{max} + \omega_t^{pu} W_{max} + p_t^{pu} P_{max}) = \sum_{t=1}^T (p_{d,t} - p_{d,t}^{dr}) LRNR - \sum_{t=1}^T p_{r,t}^{out} \quad (1)$$

式中: h_t^{pu} 、 ω_t^{pu} 、 p_t^{pu} 分别为时间 t 的水电、风力发电和光伏输出单位值; H_{max} 、 W_{max} 、 P_{max} 分别为该地区水电、风力发电和光伏的最大装机容量; $p_{d,t}$ 为用户在时间 t 内的负载需求; $p_{d,t}^{dr}$ 为用户在时间 t 内的需求响应量; LRNR 为该地区新能源消费的责任权重; $p_{r,t}^{out}$ 为时间 t 内的新能源排放量。

1.2 结合源网荷储的协调方案

考虑到该地区电力系统的技术成熟度和各种资源的发展潜力,结合相关技术类型^[9-10],提出一种面向电力领域的“源网荷储”协调规划方案,如图1所示。一是建立一个清洁、低碳、安全和高效的新型能源系统;二是促进风能和光伏资源的大规模开发和利用,以实现高比例的新能源接入;三是使用输电网来增加该地区的可再生能源比例^[11]。其中,风能(WD)和光伏(PV)的功率输出可以通过峰值负荷和大规模储能来调整,多余的部分将用于当地消费或跨区域传输,不足的部分也可以通过跨区域电网输入。

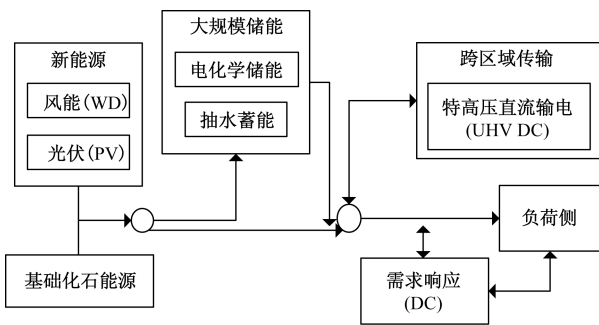


图1 面向电力领域的源网荷储协调规划方案

2 建立电力系统多元协调规划模型

2.1 电碳成本模型

针对地区电力市场价格和供需关系,将其电碳市场的情况总结为电碳成本核算模型^[12]。

电碳总成本包括投资成本、运营和维护成本、燃料成本以及碳排放成本^[13],计算公式为

$$\min C_{total} = C_{inv} + C_{om} + C_f + C_{emission} \quad (2)$$

式中: C_{inv} 为总投资成本,主要是指对各种发电源和电化学储能的新容量的投资成本; C_{om} 为运营和维护成本,主要是指各种发电源和储能发电站在输出

时的运行和维护成本; C_f 为燃料成本,主要是指燃煤发电厂消耗的燃料成本; $C_{emission}$ 为碳排放成本,主要是指煤炭发电机组在发电时排放二氧化碳时的环境污染成本。

燃料成本 C_f 的计算公式为

$$C_f = p_{coal} \sum_{t=1}^T (\xi_{coal} p_{i,t}^{pc}) \quad (3)$$

式中: p_{coal} 为该地区的煤炭市场价格; ξ_{coal} 为燃煤发电单元每单位输出的燃料消耗; $p_{i,t}^{pc}$ 为燃煤单元在时间 t 的输出功率。

碳排放成本 $C_{emission}$ 的计算公式为

$$C_{emission} = p_{car} \sum_{t=1}^T \sum_{i \in \Omega_c} emi_{c,i} p_{i,t}^{pc} \quad (4)$$

式中: p_{car} 为碳排放成本系数; $emi_{c,i}$ 为煤炭发电单元的单位碳排放; $p_{i,t}^{pc}$ 为在时间 t 时的煤炭发电量。

2.2 电力需求模型

通过 Python 实现模型建立,采用 NumPy、Pandas 和 TensorFlow 等库,读取电力供给配额节点数据集,并进行数据预处理,删除缺失值并进行标准化。将数据集划分为训练集和测试集,使用 Sequential 模型构建深度学习网络。设置两个隐藏层,并使用 ReLU 激活函数来处理数据:

```
# 构建深度学习网络
model = Sequential()
model.add(Dense(64,
input_dim=x_train.shape[1],
activation='relu'))
model.add(Dense(64, activation='relu'))
model.add(Dense(1))

训练模型预测电力供给配额节点的供给配额,
并计算模型的准确率:

# 预测并计算准确率
pred = model.predict(x_test)
acc = np.mean(np.abs(pred-y_test))
print(acc)
```

2.3 多元评估模型

进行多元评估需要收集和准备大量的数据,如新能源发电设备的运行数据、可再生能源的供应情况、环境条件等。整合数据,并将其转换为模型的输入数据。选取太阳能发电量、气温、湿度和光照强度作为模型的输入特征。

利用线性回归模型建立多元评估模型。回归模型通常由输入特征、模型参数和损失函数组成,并通过梯度下降法来拟合数据:

```
# 建立线性回归模型
model = LinearRegression()
model.fit(X_train, y_train)
```

需要调整模型的超参数来获得最优的性能。这里使用贝叶斯优化算法来自动选择超参数：

```
# 选择超参数
params = { "alpha": Real(1e-6, 1e-2,
prior="log-uniform"), "l1_ratio": Real(0, 1),}
search = BayesianOptimization(model, params)
search.fit(X_train, y_train)
print("Best hyperparameters: ", search.max())
```

用验证集来评估模型的性能,并与其他模型进行对比。这里使用平均绝对误差(MAE)和均方误差(MSE)指标来评估模型的准确性和精确性:

```
# 指标评估模型
y_pred = model.predict(X_val)
mae = mean_absolute_error(y_val, y_pred)
mse = mean_squared_error(y_val, y_pred)
print("MAE: ", mae)
print("MSE: ", mse)
```

通过评估,可以了解新能源发电的效率、可靠性、经济性及环境影响等的情况,为相关部门提供决策支持。

3 算例分析

电力供给配额预测中的不同情景。根据 2025 年某特定区域电网的供电和电网规划,将模拟条件作为输入,规划模型通过计算高、中、低 3 种不同比例新能源接入的情况下区域电网的煤电、新能源和储能能力,可得出各场景负荷值曲线,方便进行下一步对比分析。

3.1 模拟条件

根据该地区的历史载荷特征和对 2025 年最大负荷的预测,获得 2025 年该地区的 8 760 h 负载曲线,考虑需求响应潜力后的典型日负载曲线。提出高、中、低比例新能源接入系统的 3 种场景,以研究该地区电力结构的容量配置。场景 1:假设新能源的比例不高于 3 050 MW;情景 2:假设新能源的比例不高于 3 100 MW;场景 3:假设新能源的比例不高于 3 150 MW。

3.2 对比分析

根据该地区的历史载荷特征和对 2025 年最大负荷的预测,获得 2025 年该地区的 8 760 h 负载曲线,其中电化学储能发电站的充电和放电时间设置为 2 h。

3.2.1 高比例新能源接入

场景 1 下,煤炭发电、风力发电、光伏发电和电化学储能发电站的优化新安装容量分别为 550、750、2 300、260 MW。在这种情况下,不同发电单元的输出如图 2 所示。场景 1 中新安装的煤炭发电能力规模明显小于其他场景,电化学储能发电厂的装机容量最高。与其他场景相比,跨地区传输的水电和电能的产量规模更大。

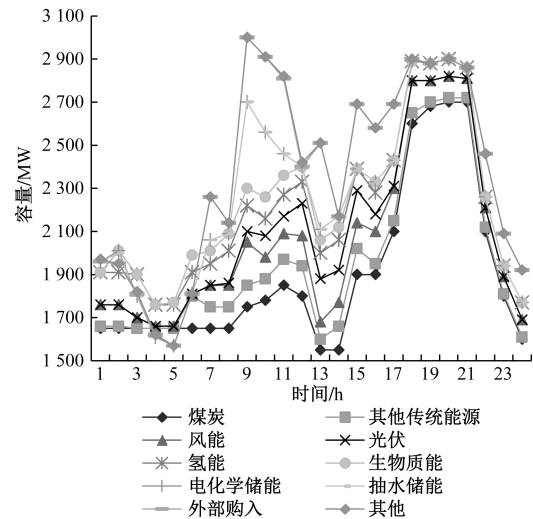


图 2 场景 1 不同发电单元的输出

3.2.2 中比例新能源接入

场景 2 中优化的煤电、风力发电、光伏发电和电化学储能发电站的优化容量分别为 600、700、2 400、220 MW。此场景中不同发电单元的输出如图 3 所示。在这种情况下,煤炭发电、风力发电、光伏和储能的装机容量处于中等水平。

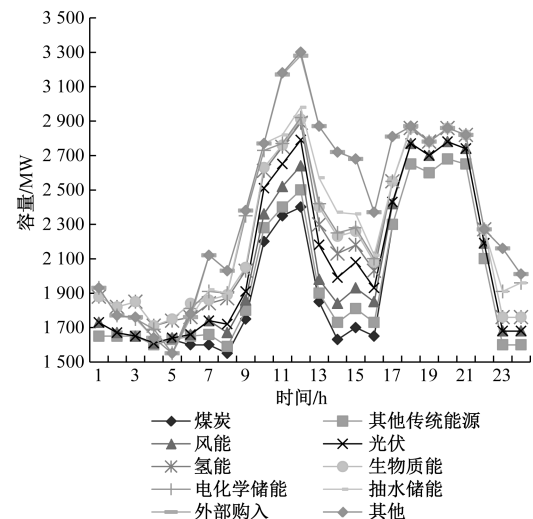


图 3 场景 2 不同发电单元的输出

3.2.3 低比例新能源接入

场景3下煤炭发电、风力发电、光伏发电和电化学储能发电站的优化新安装容量分别为700、650、2500、200 MW。此场景不同发电单元的输出如图4所示。在这种情况下,煤电单元的装机容量最大,而储能设备的装机容量比其他设备小。从图4可以看出,该系统的负载需求主要由煤炭发电单元满足,而风能和生物质能等电力单元的产量规模很小。

图5对比了3种情况下的源网荷储协调规划成本、新能源废弃电力值和系统碳排放值。从图5中可以看出,当新能源接入的比例处于中等水平,即场景2时,系统的总规划成本和废弃功率最低,但碳排放处于中等水平。主要原因是,为了确保新能源的充分消耗,新安装的高碳排放煤电厂规模比场景1更大,一方面保证减少废弃电力,另一方面保证最低的规划成本。经过实验模拟得到:2025年该地区新安装的煤炭发电、风力发电、光伏发电和电化学储能发电站的容量配置结果为600、700、2400、220 MW。

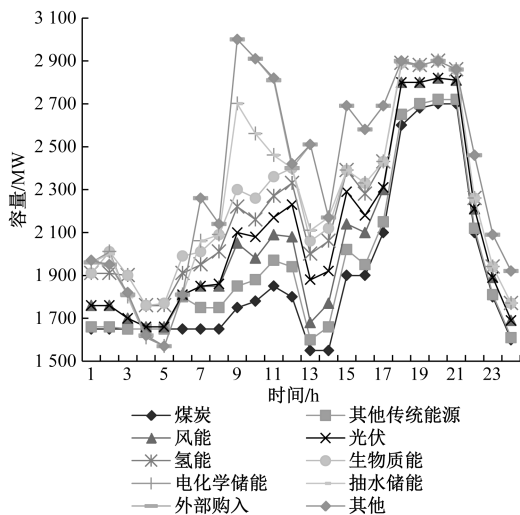


图4 场景3不同发电单元的输出

4 结论

建立了一个考虑新能源消耗的区域电力系统源网荷储协调低碳规划模型。将新能源需求和地方政策纳入电力系统规划的考量范畴中,通过模型进行预测评估获得多元协调的优化配置,更大幅度地降低系统的总规划成本。

(1)随着“双碳”目标的提出,碳排放成本逐渐被重视起来。与此同时,电力系统中新能源数量的增加,也使得对新能源废弃电力的评估变得越来越

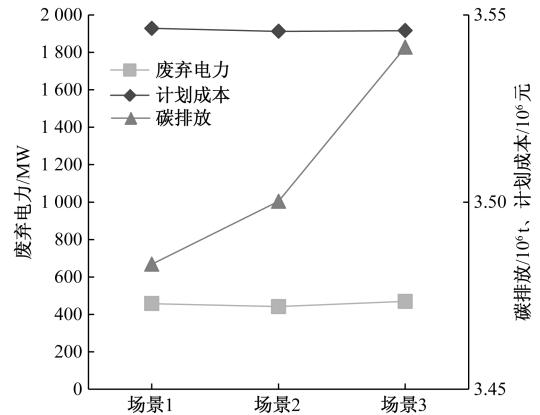


图5 不同场景对比折线图

重要。本文的模型验证了源网荷储协调规划模型可以在确保供需平衡要求的基础上,通过合理规划新能源的投入比例实现经济优化。

(2)对于新能源比例的增加产生波动性和间歇性造成的供电不足或新能源消耗的问题,在考虑该地区需求响应的规模后,仍然有必要部署大规模的储能发电站来进行削峰填谷。建议相关部门持续关注煤炭电力的灵活改造,同时大力支持储能发电站的建设,以提高系统的灵活调整能力。

由于对发电侧的技术类型和响应潜力的考虑有限,下一步将是加强源端各类单元之间的协调,以实现源网荷储更好地互动,从而使负荷侧的资源变得更加稳定可控。此外,最终规划结果仍以单一的经济目标为主,可以进一步考虑低碳环保方面,以建立一个多目标多领域的源网荷储协调规划模型。

参考文献

- [1] 鲁晓秋,叶影,曹春,等. 分布式光伏接入的配电网规划综合评价方法[J]. 华北电力大学学报(自然科学版), 2023(8): 1-10.
- [2] 游大宁,刘航航,鲍冠南,等. 源网荷储多元协同调度体系研究与实践[J]. 浙江电力, 2021, 40(12): 20-26.
- [3] MORADI-SEPAHVAND M, AMRAEE T. Integrated expansion planning of electric energy generation, transmission, and storage for handling high shares of wind and solar power generation [J]. Applied Energy, 2021, 298: 117137.
- [4] MAO J, JAFARI M, BOTTERUD A. Planning low-carbon distributed power systems: evaluating the role of energy storage[J]. Energy, 2022, 238: 121668.
- [5] ZHOU Y, ZHAI Q, YUAN W, et al. Capacity expansion planning for wind power and energy storage considering hourly robust transmission constrained unit commitment[J]. Applied Energy, 2021, 302: 117570.

- [6] FLORES-QUIROZ A, KAI S. A distributed computing framework for multi-stage stochastic planning of renewable power systems with energy storage as flexibility option[J]. *Applied Energy*, 2021, 291: 116736.
- [7] 董治新, 韩雅莹, 杨丽, 等. “源-网-荷-储”互动下适应多元主体需求的灵活性交易机制研究[J]. *现代电力*, 2023(8): 1-10.
- [8] 李强, 赵峰, 刘茂凯, 等. 双碳目标下面向清洁能源消纳的源网荷储协调控制[J]. *自动化与仪表*, 2023, 38(7): 19-23.
- [9] 韩朝阳. 浅谈能源多能互补综合利用评估技术分析[J]. *中国设备工程*, 2021(8): 166-167.
- [10] 杨冬梅, 王俊, 杜炜. 考虑源网荷储聚合交易的区域电热综合能源系统优化调度[J]. *电力建设*, 2021, 42(10): 28-39.
- [11] 李建林, 谭宇良, 王含, 等. 配网及光储微网储能系统配置优化策略[J]. *高电压技术*, 2022, 48(5): 1893-1902.
- [12] 罗金满, 刘丽媛, 刘飘, 等. 考虑源网荷储协调的主动配电网优化调度方法研究[J]. *电力系统保护与控制*, 2022, 50(1): 167-173.
- [13] 张晓辉, 陈冰, 贺勇, 等. 含能效电厂的计及线损率的多目标低碳电源规划[J]. *太阳能学报*, 2020, 41(5): 250-257.

Multi-source Coordinated Programming Model Construction Method for New Power System

GAO Xin¹, JIN Xin², ZHAO Tong², MEI Zheng², WEI Jiandong², LI Mengshuai²

(1. Northwest Branch of State Grid Company, Xi'an 710048, China;

2. Beijing Kedong Electric Power Control System Co., Ltd., Beijing 100192, China)

Abstract: In order to obtain relatively controllable power output and ensure the safe, stable and efficient operation of the power system, based on the development trend of multiple access and the development path of electric carbon coupling, a construction method of multiple coordinated planning model combining the system demand forecast, power quantity balance and renewable energy quota is proposed. The experiment proves that the model established can estimate the cost of electricity carbon, and the planning results can be used to alleviate the inconsistency between power resources and load demand, and provide theoretical reference for increasing the installation proportion of clean energy, reducing carbon emission, and optimizing the power structure.

Keywords: new power system; new energy; multiple coordination; power plan model