

含电解铝工业园区的柔性配电网低碳优化运行

张儒峰, 庞淞元, 付麟博, 孙海航, 陈厚合

(东北电力大学 现代电力系统仿真控制与绿色电能新技术教育部重点实验室, 吉林 吉林 132012)

摘要:面向含智能储能软开关的柔性配电网,提出一种含电解铝工业园区的柔性配电网低碳优化运行方法。基于电解铝生产环节用能与调节特性,考虑园区生产用能互动能力,构建电解铝工业园区电-碳耦合模型,计算园区实时碳排放量,验证其降碳能力;分析智能储能软开关运行特性,结合碳排放流理论构建智能储能软开关多状态电-碳耦合模型,核算智能储能软开关碳排放分布;以配电网综合运行成本最小为优化目标,提出含电解铝工业园区的柔性配电网低碳优化运行模型,设置多个运行场景进行对比验证。算例结果表明,所提方法提升了配电网运行的经济性、低碳性。

关键词:柔性配电网;电解铝工业园区;智能储能软开关;碳排放流理论;低碳经济调度

中图分类号:TM76;TM564

文献标志码:A

DOI:10.16081/j.epae.202508001

0 引言

“双碳”战略背景下,随着电力电子设备规模化应用,传统刚性配电网逐渐转变为可灵活调控的柔性配电网(flexible distribution network,FDN)^[1-3],配电网低碳化发展成为电力系统实现清洁转型的重要环节^[4-6]。以电解铝工业为代表的配电网高耗能工业负荷具有灵活响应能力^[7-10],与FDN联合优化,可以实现配电网源网荷储协同调控,提升配电网运行经济性与降碳能力。

目前,FDN优化运行方面的研究受到广泛关注。文献[11]提出多端智能软开关(soft open point,SOP)的双时间尺度鲁棒优化方法;文献[12]提出考虑SOP的多源分发服务恢复策略,有效提高负载恢复水平;文献[13]结合SOP运行特性,构建基于鲁棒优化方法的新型双层服务恢复模型,旨在最大限度地降低负载损失的风险;文献[14]考虑到柔性互联装置使配电台区实现灵活互动,提出基于运行状态分级的自适应优化调度策略,平衡系统运行经济性和电压质量;文献[15]采用等效投影法,提出多微电网FDN协同优化运行方法;文献[16]建立SOP接入的配电网低碳运行场景,验证SOP可以有效提升配电网对分布式电源(distributed generation,DG)的消纳能力,并核算SOP碳流分布。

上述研究表明SOP能够有效提升配电网运行效率,但在高成本约束下,SOP的利用率亟需提升并进一步拓展其功能。文献[17]梳理中压配电网多台区柔性互联技术应用现状,并对其发展趋势展开讨论;

文献[18]建立计及共享储能参与的点对点电力共享交易机制,提出产消者租赁共享储能的两阶段定价策略;文献[19]提出了考虑智能储能软开关(SOP with energy storage system,ESOP)、光伏逆变器等设备的配电网混合时间尺度鲁棒优化运行方法;文献[20]建立基于边缘智能的计及ESOP配电网优化调度模型;文献[21]构建计及ESOP的鲁棒优化调度模型,提升极端条件下系统灵活性。综上,现有研究多聚焦于FDN运行中ESOP的潮流调控能力,但尚未考虑ESOP对碳流动态调控能力与新能源消纳方面的降碳潜力,对其碳排放核算领域仍存在不足。

现有文献对电解铝工业负荷参与电网优化运行方面开展了一些研究。文献[22]考虑电解铝负荷物理特性,构建电解铝负荷生产-调节模型,量化其调节裕度和备用容量边界;文献[23]构建基于纳什协商理论的电网-发电机-电解铝多智能体合作博弈模型,提升系统运行收益及电解铝生产效率;文献[24]建立了工艺约束驱动下,基于电解槽能量流优化的可调容量评估模型;文献[25]以电解铝负荷为新调峰资源参与电网调度,构建电解铝负荷和火电深调联合调峰的分层优化模型,优化电网调峰结构与发电经济性;文献[26]提出兼顾电解铝负载瞬态过流特性和电网瞬态电压稳定性的应急控制策略。上述研究结合电解铝生产用能调节特性,对电解铝负荷参与系统运行影响进行分析,但缺乏考虑电解铝负荷的降碳作用。

针对上述问题,本文提出含电解铝工业园区(electrolytic aluminum industrial park,EAIP)的FDN低碳优化运行方法,旨在协同ESOP、EAIP、DG等环节,优化其运行方式以达到最佳降碳效果。结合EAIP实际生产模式及其灵活调节能力,构建EAIP电-碳耦合模型,计算其生产环节消耗碳排放量;基

收稿日期:2025-04-14;修回日期:2025-06-29

在线出版日期:2025-08-04

基金项目:国家重点研发计划项目(2023YFB2407300)

Project supported by the National Key R&D Program of China(2023YFB2407300)

于ESOP运行特性及储能机制,构建ESOP多状态电-碳耦合模型,核算不同工作模式下ESOP实时碳排放分布;在此基础上,构建以最小化系统综合运行成本为目标的含EAIP的FDN低碳优化运行模型,通过多场景对比验证FDN源网荷储协同降碳能力,实现系统运行的低碳性、经济性。

1 EAIP电-碳耦合模型

1.1 EAIP运行框架

本节所考虑的EAIP采用冰晶石-氧化铝熔盐电解法在电解槽中进行冶炼,生产工艺流程如图1所示。电解铝生产系列由多个电解槽串联形成,其总功率被视为电解铝负荷,该负荷具备电能消耗稳定的特性。考虑到电解生产工序用能约占EAIP总用电量的95%以上,因此,本节中EAIP负荷仅考虑电解铝生产设备消耗的电能,即以电解槽为核心的电解铝负荷。

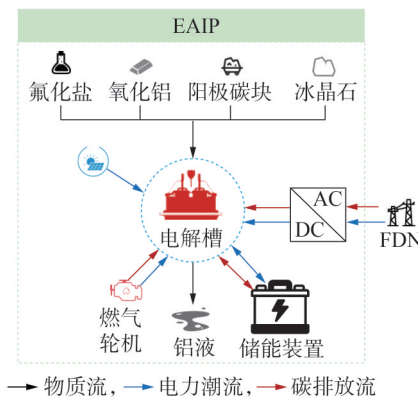


图1 EAIP生产工艺流程图

Fig.1 Production process flowchart of EAIP

EAIP以氧化铝为熔质,将混杂氟化盐的冰晶石作为降低氧化铝熔点的溶剂,在通入数百kA直流电的电解槽中冶炼上述电解质,直流电由与FDN耦合的变电站、园区光伏等多个设备提供。电解铝负荷作为热蓄能负荷,在950~970℃下^[27],将电解质中的氧化铝与阳极碳块发生化学反应置换出熔融态铝单质。考虑其热惯性时间常数较大,因此,在短时间内一定幅度的功率削减不会对电解槽生产效率造成严重影响,即保证电解质中冰晶石处于熔融态,使电解铝反应稳定持续进行。综上,电解铝可以作为具有灵活响应能力的工业负荷为电网提供灵活性支撑。而调节有载变压器分接头、饱和电抗器,可以在较大范围内对负荷进行连续平滑调节,但电解铝生产完全的启停过程所需时间长,成本高昂。因此,本文将电解铝工业负荷视为不可中断、仅可在一定范围内调节功率的柔性负荷。

EAIP的碳排放与电力潮流耦合,受所在FDN节

点碳势、园区燃气轮机出力以及储能装置充放电过程调控。而园区光伏出力替代传统能源满足负荷需求可以显著降低EAIP整体碳排放量。

1.2 EAIP电-碳耦合模型

1.2.1 EAIP生产功率与系列电流约束

电解铝生产系列的工艺等效电路图^[28]表明,生产功率与系列电流存在近似平方的关系,构建EAIP功率约束如下:

$$\begin{cases} P_{Al,n,t} = I_{Al,n,t}^2 R_{m,n} + I_{Al,n,t} E_{m,n} \\ P_{Al,n}^{\min} \leq P_{Al,n,t} \leq P_{Al,n}^{\max} \\ I_{Al,n}^{\min} \leq I_{Al,n,t} \leq I_{Al,n}^{\max} \end{cases} \quad (1)$$

式中: $P_{Al,n,t}$ 、 $I_{Al,n,t}$ 分别为 t 时刻第 n 条电解铝生产系列的生产功率、系列电流; $R_{m,n}$ 、 $E_{m,n}$ 分别为第 n 条电解铝生产系列的等效电阻、等效反电动势; $P_{Al,n}^{\max}$ 、 $P_{Al,n}^{\min}$ 分别为第 n 条电解铝生产系列固有功率上、下限; $I_{Al,n}^{\max}$ 、 $I_{Al,n}^{\min}$ 分别为第 n 条电解铝生产系列固有电流上、下限。

1.2.2 EAIP生产功率与电解槽热惯性约束

考虑电解槽热惯性效应,EAIP短时间内削减电解铝负荷可同步实现EAIP节能与产量稳定,构建EAIP电-热协同约束如下:

$$\begin{cases} P_{re,n,t}^{\min} \leq P_{Al,n,t} \leq P_{re,n,t}^{\max} \\ P_{re,n,t}^{\min} = P_{Al,n,t-1} + c_e m_e (T_{Al,n}^{\min} - T_{Al,n,t-1}) / \Delta t \\ P_{re,n,t}^{\max} = P_{Al,n,t-1} + c_e m_e (T_{Al,n}^{\max} - T_{Al,n,t-1}) / \Delta t \\ T_{Al,n}^{\min} \leq T_{Al,n,t} \leq T_{Al,n}^{\max} \end{cases} \quad (2)$$

式中: $P_{re,n,t}^{\max}$ 、 $P_{re,n,t}^{\min}$ 分别为第 n 条电解铝生产系列受电解槽 t 时刻温度影响的功率上、下限; c_e 、 m_e 分别为冰晶石的比热容系数及质量; $T_{Al,n}^{\max}$ 、 $T_{Al,n}^{\min}$ 分别为第 n 条电解铝生产系列温度上、下限,即氧化铝熔点上、下限; $T_{Al,n,t}$ 为 t 时刻第 n 条电解铝生产系列电解槽温度; Δt 为时间间隔。

1.2.3 EAIP运行状态约束

通过引入摩尔变量表示电解铝负荷功率上升、功率下降、稳定工作状态,分析其与生产运行的耦合关系,构建EAIP运行状态约束见附录A式(A1)。

1.2.4 EAIP产能约束

EAIP总产能为各电解槽产额之和,维持恒定总产能是保障园区经济收益的关键。在非调峰工况下,生产系列默认采用恒功率运行模式;但当EAIP参与电网调度时,因功率波动引发的温度变化影响电解环节生产效率^[29]。构建EAIP产能约束如下:

$$\begin{cases} \eta_{n,t} = \eta_{N,n} + 1.5\% (T_{N,n} - T_{Al,n,t}) \\ M_{Al,N,n} = \sum_{t \in T} M_{Al,n,t} \\ M_{Al,n,t} = N_n \eta_{n,t} K_{Al} I_{Al,n,t} \Delta t \end{cases} \quad (3)$$

式中: $\eta_{n,t}$ 为 t 时刻第 n 条电解铝生产系列的生产效率; $\eta_{N,n}$ 为第 n 条电解铝生产系列额定生产效率,通

常为94%; $T_{N,n}$ 为第 n 条电解铝生产系列的额定生产温度; $M_{Al,N,n}$ 、 $M_{Al,n,t}$ 分别为第 n 条电解铝生产系列的运行周期额定总产量、 t 时刻产量; N_n 为第 n 条电解铝生产系列的电解槽数量; K_{Al} 为电解铝电化学当量; T 为运行周期时刻集合。

1.2.5 EAIP功率平衡约束

结合EAIP潮流流向情况,构建EAIP功率平衡约束如下:

$$P_{Al,t} = \sum_{n=1}^{N_{Al}} P_{Al,n,t} = P_{\text{pec},t} + P_{\text{PV},Al,t} + P_{\text{MT},Al,t} + P_{\text{Al},t}^{\text{dis}} - P_{\text{Al},t}^{\text{ch}} \quad (4)$$

式中: $P_{Al,t}$ 为 t 时刻EAIP生产总功率; N_{Al} 为电解铝生产系列数量; $P_{\text{pec},t}$ 为 t 时刻FDN向园区注入的功率; $P_{\text{PV},Al,t}$ 、 $P_{\text{MT},Al,t}$ 分别为 t 时刻园区内光伏机组、燃气轮机出力; $P_{\text{Al},t}^{\text{ch}}$ 、 $P_{\text{Al},t}^{\text{dis}}$ 分别为 t 时刻园区内储能装置的充、放电功率。

1.2.6 EAIP生产消耗碳排放量模型

基于碳排放流理论,结合EAIP实时用能特征,构建EAIP生产环节消耗碳排放量如下:

$$C_{Al,t} = e_{\text{pec},t} P_{\text{pec},t} + e_{\text{MT},t} P_{\text{MT},Al,t} + e_{\text{ESS},t}^{\text{dis}} P_{\text{Al},t}^{\text{dis}} \quad (5)$$

式中: $C_{Al,t}$ 为 t 时刻电解铝工业园区消耗碳排放量; $e_{\text{pec},t}$ 为 t 时刻公共连接节点的节点碳势; $e_{\text{MT},t}$ 为 t 时刻燃气轮机碳排放强度; $e_{\text{ESS},t}^{\text{dis}}$ 为 t 时刻处于放电状态下的储能装置碳排放强度。

2 ESOP多状态电-碳耦合模型

2.1 ESOP多状态电-碳耦合机理

替代传统刚性配电网联络开关的ESOP^[30],实现馈线间功率连续快速调节,提升系统运行灵活性、供电弹性,其两端结构对称的换流器在实现FDN潮流的双向灵活流动与精确控制的同时,安装于直流部分的储能装置使ESOP从时空层面对FDN潮流进行更灵活的调控。考虑到ESOP传输功率效率高,因此,本节将ESOP两端结构对称的换流器视为可发出无功功率的无损支路,并将ESOP中直流转换器与换流器的连接点设置为虚拟节点 k ,ESOP拓扑结构及潮流、碳流分布情况如图2所示。

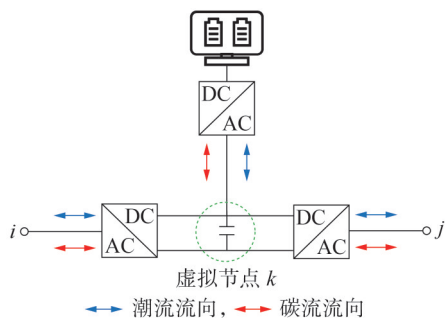


图2 ESOP潮流、碳流分布图

Fig.2 Distribution map of ESOP power flow and carbon flow

ESOP双端换流器耦合电力潮流与碳流,平抑馈线 i 、 j 负荷波动,实现FDN灵活弹性调控。同时,通过ESOP储能装置的离线、充电与放电状态运行特性,借助虚拟节点 k 与ESOP双端实现电-碳交互。本节结合碳排放流理论,定义ESOP虚拟储碳量为其储电量等效的发电侧碳排放量,相关理论见附录A中ESOP虚拟储碳量部分。当核算ESOP储能装置碳势时,须考虑储能装置在不同运行状态下虚拟节点 k 的碳势特点以及储能装置储电量、虚拟储碳量对不同状态下储能装置碳势计算的影响。多状态ESOP储能装置对节点碳势的影响如下。

1)离线状态:离线状态下的ESOP等效为SOP,在作为连接各节点有功功率“支路”的同时,发出无功功率参与配电网运行。离线状态下无须对ESOP储能装置节点碳势进行建模。

2)充电状态:充电状态下的ESOP储能装置等效为FDN负荷节点参与运行调控,通过动态功率调节提升新能源消纳能力,其节点碳势依据负荷节点碳势核算方法进行计算。

3)放电状态:放电状态下的ESOP储能装置等效为“机组”,通过虚拟节点 k 向FDN注入低碳电能,对该状态储能装置的碳势求解须考虑其时序性影响,即储电量、虚拟储碳量变化的影响。

2.2 ESOP多状态电-碳耦合模型

2.2.1 ESOP多状态潮流模型

ESOP通过双端换流器及储能装置灵活参与FDN潮流调控,本节结合ESOP双端换流器功率流向及储能装置充放电功率,考虑ESOP储能装置多状态对潮流调控影响,构建ESOP多状态潮流模型,包括ESOP运行约束、ESOP储能约束,具体表达式见附录A式(A2)、(A3)。

2.2.2 ESOP多状态碳流模型

基于碳排放流理论,考虑ESOP多端口动态潮流运行机理与储能装置多状态运行特征,精细化核算ESOP碳排放分布与虚拟储碳量时序变化,构建ESOP多状态碳流模型。

1)ESOP虚拟节点 k 的节点碳势约束。

$$e_{k,t} = \frac{\sum_{i \in N^+} P_{ik,t} e_{i,t} + P_{\text{ESOP},t}^{\text{dis}} e_{\text{ESOP},t}^{\text{dis}}}{\sum_{i \in N^+} P_{ik,t} + P_{\text{ESOP},t}^{\text{dis}}} \quad (6)$$

式中: $e_{k,t}$ 为 t 时刻虚拟节点 k 的节点碳势; N^+ 为ESOP连接节点集合; $P_{ik,t}$ 为 t 时刻节点 i 向虚拟节点 k 注入的有功功率; $e_{i,t}$ 为 t 时刻节点 i 的节点碳势; $P_{\text{ESOP},t}^{\text{dis}}$ 为 t 时刻ESOP储能装置通过虚拟节点对配电网的注入功率,即ESOP在 t 时刻的放电功率; $e_{\text{ESOP},t}^{\text{dis}}$ 为 t 时刻放电状态下ESOP储能装置的碳势。

2)多状态耦合ESOP储能装置碳势约束。

a) 离线状态。

该状态下 ESOP 作为 SOP 参与系统运行, 无须对其储能装置建模, 仅进行馈线间潮流调节, 即:

$$P_{ESOP,i,t} + P_{ESOP,j,t} = 0 \quad (7)$$

式中: $P_{ESOP,i,t}$ 、 $P_{ESOP,j,t}$ 分别为 t 时刻 ESOP 向节点 i 、 j 注入的有功功率。

b) 充电状态。

该状态下 ESOP 储能装置等效为“负荷节点”, 其碳势仅受虚拟节点 k 碳势影响, 即:

$$e_{ESOP,t}^{ch} = \frac{P_{ESOP,t}^{ch} e_{k,t}^{ch}}{P_{ESOP,t}^{ch}} \quad (8)$$

式中: $e_{ESOP,t}^{ch}$ 为 t 时刻充电状态下储能装置的碳势; $P_{ESOP,t}^{ch}$ 为 t 时刻 ESOP 储能装置通过虚拟节点对配电网的接收功率, 即 ESOP 在 t 时刻的充电功率。

c) 放电状态。

该状态下 ESOP 储能装置作为“机组”为 FDN 缓解供能压力, 其碳势受自身时序性影响。因此, 求解 t 时刻放电状态下 ESOP 储能装置的碳势, 须对初始时刻至 t 时刻的储电量、虚拟储碳量进行核算, 即:

$$E_t = E_0 + \eta_{ch} \sum_{a \in [t_0, t]} P_{ESOP,a}^{ch} - \frac{\sum_{a \in [t_0, t]} P_{ESOP,a}^{dis}}{\eta_{dis}} \quad (9)$$

$$C_t = C_0 + \sum_{a \in [t_0, t]} P_{ESOP,a}^{ch} e_{k,a} - \sum_{a \in [t_0, t]} P_{ESOP,a}^{dis} e_{ESOP,a}^{dis} \quad (10)$$

$$e_{ESOP,t}^{dis} = \frac{C_t}{E_t} \quad (11)$$

式中: E_0 、 C_0 分别为储能装置初始储电量、初始虚拟储碳量; t_0 为运行周期初始时刻; E_t 、 C_t 分别为 t 时刻储能装置的储电量、虚拟储碳量; η_{ch} 、 η_{dis} 分别为 ESOP 充、放电损耗系数; $P_{ESOP,a}^{ch}$ 、 $P_{ESOP,a}^{dis}$ 分别为 a 时刻 ESOP 储能装置充、放电功率; $e_{k,a}$ 、 $e_{ESOP,a}^{dis}$ 分别为 a 时刻虚拟节点 k 、放电状态下 ESOP 储能装置的碳势。

3 含 EAIP 的 FDN 低碳优化运行方法

3.1 方法框架

本章建立了含 EAIP 的 FDN 低碳优化运行框架, 框架结构如图 3 所示。其中, ESOP 对配电网进行柔性拓扑改造, FDN 通过公共连接节点为园区提供电能。

在图 3 所示的运行框架中, ESOP、EAIP 等模块与 FDN 拓扑间均存在独立的信息和能量交互, 碳排放量与能量具有耦合关系。在信息交互方面, FDN 根据所接收的主网实时电价与碳势信息、EAIP 的生产任务量以及 FDN 和园区中各发电机组与储能装置的基础数据, 以 FDN 综合运行成本最小化为目标进行优化运行决策, 获得各电源、储能装置以及电解铝负荷的调度方案, 并作为信息指令发送给相应环节。在能量交互方面, 主网与光伏机组为 FDN 的负

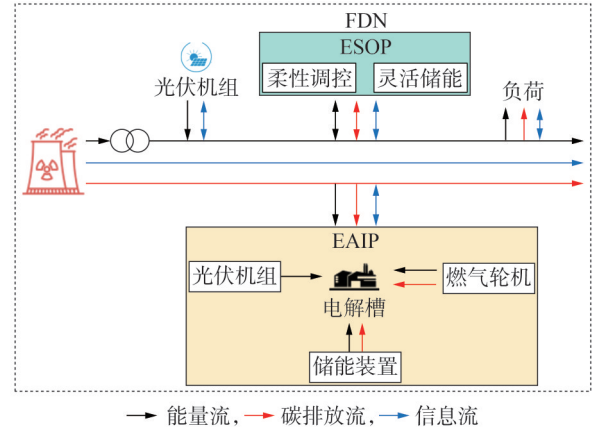


图3 含 EAIP 的 FDN 低碳优化运行框架
Fig.3 FDN low-carbon optimization operation framework with EAIP

荷用户提供电能, EAIP 的生产负荷由 FDN 供电、园区光伏发电、燃气轮机及储能装置供给, ESOP 灵活调控系统电力潮流分布, 协同满足整体负荷需求。而碳排放流依附于电力潮流, 主网与园区燃气轮机注入 FDN 碳排放, 光伏作为零碳机组参与 FDN 的碳排放计算, 根据负荷分布, 借助网络拓扑与 ESOP 将所注入的碳排放流分布于 FDN 各节点, 并计算 FDN 各节点碳势, 实现 FDN 的动态碳流追踪。

3.2 含 EAIP 的 FDN 低碳优化运行模型

3.2.1 目标函数

本文考虑 FDN 电力潮流、碳流耦合关系, 结合 ESOP 多状态运行方式和 EAIP 需求侧可调特性对配电网优化运行的影响, 以 FDN 最小化综合运行成本 F 为目标函数, 构建 FDN 低碳优化运行模型。FDN 综合运行成本包括主网购电成本 C_{tr} 、燃气轮机运行成本 C_{MT} 、线路网损成本 C_l 、碳排放费用 C_C 、EAIP 电解槽运行成本 C_{Al} 、ESOP 运维成本 C_{ESOP} , 具体如下:

$$\min F = C_{tr} + C_{MT} + C_l + C_C + C_{Al} + C_{ESOP} \quad (12)$$

$$C_{tr} = \sum_{t \in T} \lambda_t P_{trans,t} \quad (13)$$

$$C_{MT} = \sum_{t \in T} c_{MT} P_{MT,Al,t} \quad (14)$$

$$C_l = \lambda_{loss} \sum_{t \in T} \sum_{l=1}^{N_l} I_{l,t}^2 r_l \quad (15)$$

$$C_C = \alpha_C \sum_{t \in T} (P_{trans,t} e_{trans,t} + P_{MT,Al,t} e_{MT,t}) \quad (16)$$

$$C_{Al} = c_{Al} \sum_{t \in T} P_{Al,t} \quad (17)$$

$$C_{ESOP} = \eta_{ESOP} [c_{ESOP}^{ch} (S_{ESOP,t} + S_{ESOP,t}) + c_{ESOP}^{DCDC} S_{ESOP,t}^{DCDC} + c_{ESOP}^{ESS} S_{ESOP,t}^{ESS}] \quad (18)$$

式中: $P_{trans,t}$ 为 t 时刻主网注入功率; λ_t 为 t 时刻主网分时电价; c_{MT} 为燃气轮机运行成本; λ_{loss} 为单位网损成本; N_l 为配电网支路集合; $I_{l,t}$ 为 t 时刻第 l 条支路上电流; r_l 为第 l 条支路电阻; α_C 为单位碳排放处理

成本; $e_{\text{trans},t}$ 为 t 时刻主网实时碳势; c_{Al} 为 EAIP 电解槽运行成本系数; η_{ESOP} 为 ESOP 运维费用系数; c_{ESOP}^c 、 $c_{\text{ESOP}}^{\text{DCDC}}$ 、 $c_{\text{ESOP}}^{\text{ESS}}$ 分别为 ESOP 换流器、直流转换器、储能装置的单位容量投资成本; $S_{\text{ESOP},i}$ 和 $S_{\text{ESOP},j}$ 、 $S_{\text{ESOP},i}^{\text{DCDC}}$ 、 $S_{\text{ESOP},i}^{\text{ESS}}$ 分别为节点 i 和节点 j 处 ESOP 换流器、直流转换器、储能装置容量。

3.2.2 约束条件

EAIP、ESOP 电-碳耦合约束分别见 1.2、2.2 节, FDN 运行及碳排放相关约束如下。

1) 节点功率平衡约束。

$$\begin{cases} \sum_{i \in v_1} P_{ij,t} - l_{ij,t} r_{ij} - \sum_{k \in v_2} P_{jk,t} + P_{\text{in},j,t} - P_{\text{out},j,t} = 0 \\ P_{\text{in},j,t} = P_{\text{trans},j,t} + P_{\text{PV},j,t} + P_{\text{ESOP},j,t} \\ P_{\text{out},j,t} = P_{\text{D},j,t} + P_{\text{pcc},j,t} \\ \sum_{i \in v_1} Q_{ij,t} - l_{ij,t} x_{ij} - \sum_{k \in v_2} Q_{jk,t} + Q_{\text{in},j,t} - Q_{\text{D},j,t} = 0 \\ Q_{\text{in},j,t} = Q_{\text{trans},j,t} + Q_{\text{PV},j,t} + Q_{\text{ESOP},j,t} \end{cases} \quad (19)$$

式中: v_1 为末端节点为 j 的支路初始节点集合; v_2 为初始节点为 j 的支路末端节点集合; $Q_{ij,t}$ 为 t 时刻支路 ij 无功功率, $P_{ij,t}$ 、 $Q_{ij,t}$ 的正方向为节点 i 流向节点 j ; $P_{jk,t}$ 、 $Q_{jk,t}$ 分别为 t 时刻支路 jk 的有功、无功功率, 正方向为节点 j 流向虚拟节点 k ; $l_{ij,t}$ 为 t 时刻支路 ij 电流平方; r_{ij} 、 x_{ij} 分别为支路 ij 电阻、电抗; $P_{\text{in},j,t}$ 、 $Q_{\text{in},j,t}$ 分别为 t 时刻节点 j 处机组及 ESOP 注入有功、无功功率之和; $P_{\text{out},j,t}$ 为 t 时刻节点 j 处负荷与园区有功功率之和; $P_{\text{trans},j,t}$ 、 $Q_{\text{trans},j,t}$ 分别为 t 时刻节点 j 处主网向 FDN 注入的有功、无功功率; $P_{\text{PV},j,t}$ 、 $Q_{\text{PV},j,t}$ 分别为 t 时刻节点 j 处光伏机组输出的有功、无功功率; $Q_{\text{ESOP},j,t}$ 为 t 时刻 ESOP 向节点 j 注入的注入的无功功率; $P_{\text{D},j,t}$ 、 $Q_{\text{D},j,t}$ 分别为 t 时刻节点 j 处负荷的有功、无功功率; $P_{\text{pcc},j,t}$ 为节点 j 向园区注入的有功功率。

2) FDN 潮流约束。

$$\begin{cases} u_{j,t} - u_{k,t} - 2(r_{jk} P_{jk,t} + x_{jk} Q_{jk,t}) + l_{jk,t} (r_{jk}^2 + x_{jk}^2) = 0 \\ \|2P_{jk,t} \quad 2Q_{jk,t} \quad l_{jk,t} \quad -u_{j,t}\|_2 \leq l_{jk,t} + u_{j,t} \\ (u_j^{\min})^2 \leq u_{j,t} \leq (u_j^{\max})^2 \\ 0 \leq l_{jk,t} \leq (I_{jk}^{\max})^2 \end{cases} \quad (20)$$

式中: $u_{j,t}$ 、 $u_{k,t}$ 分别为 t 时刻节点 j 、虚拟节点 k 电压平方; $l_{jk,t}$ 为 t 时刻支路 jk 电流平方; r_{jk} 、 x_{jk} 分别为支路 jk 的电阻、电抗; u_j^{\max} 、 u_j^{\min} 为节点 j 电压上、下限; I_{jk}^{\max} 为正常运行时支路 jk 允许的电流最大值。

3) 光伏逆变器约束。

$$\begin{cases} 0 \leq P_{\text{PV},j,t} \leq P_{\text{PV},j}^{\max} \\ (P_{\text{PV},j,t})^2 + (Q_{\text{PV},j,t})^2 \leq (S_{\text{PV},j})^2 \\ -\tan \theta_{\text{PV},j} P_{\text{PV},j,t} \leq Q_{\text{PV},j,t} \leq \tan \theta_{\text{PV},j} P_{\text{PV},j,t} \end{cases} \quad (21)$$

式中: $P_{\text{PV},j}^{\max}$ 为节点 j 处光伏机组最大有功出力; $S_{\text{PV},j}$ 为

节点 j 处光伏机组容量; $\theta_{\text{PV},j}$ 为节点 j 处光伏机组最大功率因数角。

4) 碳排放流指标模型。

本文构建碳排放流指标矩阵对计及 ESOP 的 FDN 碳排放进行核算, 碳排放流相关理论及相关指标矩阵见式 (A4)~(A10)、附录 A 表 A1, 碳流指标表征 FDN 拓扑结构中碳排放分布情况, 为 FDN 碳足迹追踪提供理论支持。其中, 节点碳势表示节点 j 消费单位电能所等效的发电侧碳排放量, 而基于比例共享原则, 源自节点 j 的全部支路碳流密度均与节点 j 的节点碳势相等。

$$\begin{cases} e_{N,j,t} = \frac{\sum_{i \in v_1} P_{ij,t} e_{i,t} + P_{\text{trans},j,t} e_{\text{trans},j,t}}{\sum_{i \in v_1} P_{ij,t} + P_{\text{trans},j,t} + P_{\text{PV},j,t}} \\ \rho_{jk,t} = e_{N,j,t} \quad k \in v_2 \end{cases} \quad (22)$$

式中: $e_{N,j,t}$ 为 t 时刻节点 j 的额定碳势; $e_{\text{trans},j,t}$ 为 t 时刻节点 j 处主网实时碳势; $\rho_{jk,t}$ 为 t 时刻支路 jk 碳流密度。

4 算例分析

4.1 改进 IEEE 15 节点算例参数

本文以 1 d 为调度周期, 采用改进 IEEE 15 节点配电网为例进行仿真分析, 其网络拓扑如图 4 所示。3 台光伏机组 FDN 分别接入节点 5、11、14, 其出力日时序特性曲线见附录 B 图 B1。节点 1 连接主网, 主网分时电价及实时碳势见附录 B 图 B2, 其中 [00:00, 09:00) 与 [19:00, 24:00) 为主网低碳时期, [09:00, 19:00) 为主网高碳时期。EAIP 安装于节点 8, 其负荷参数为某实际区域电解铝厂数据^[25], 园区部分参数见附录 B 表 B1。ESOP 位于节点 6、10 之间, 其储能装置容量为 10 MW, 初始储电量为 1 MW, 初始碳势为 400 gCO₂/kW。算例分析基于 MATLAB 2021a 平台, 采用 Gurobi 求解器对所提模型进行求解。为验证本文所提方法有效性, 设置 3 种场景进行对比

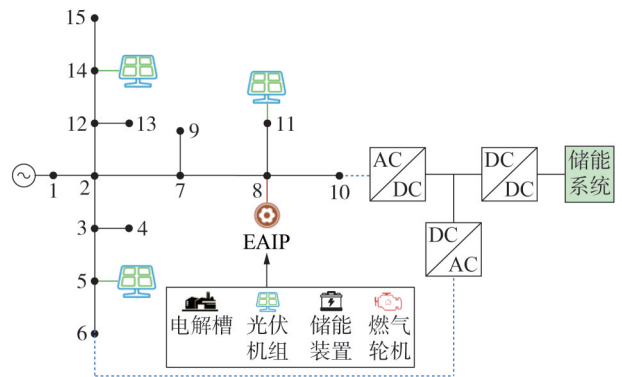


图4 改进 IEEE 15 节点配电网拓扑图

Fig.4 Topology diagram of improved IEEE 15-bus distribution network

分析:场景1,不考虑低碳调度的含EAIP刚性配电网优化运行;场景2,考虑低碳调度的含EAIP刚性配电网优化运行;场景3,考虑低碳调度的含EAIP、ESOP的FDN优化运行。

4.2 算例分析

4.2.1 成本对比分析

各场景的购电成本与配电网购电量强相关,实时购电量的对比微观反应购电成本的具体差异,各场景实时购电量对比如图5所示。

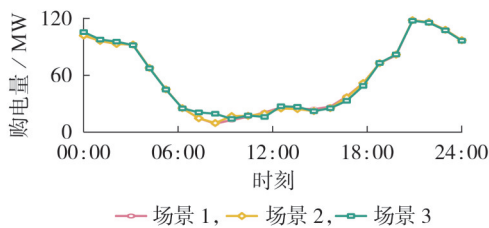


图5 各场景下配电网向主网购电量对比

Fig.5 Comparison of power purchase from distribution network to main network in each scenario

由图5可知:各场景购电量整体呈现先骤降后上升趋势。其中,虽然场景3局部时段出现购电量偏高现象,但整体购电量仍低于其他场景。各场景购电量波动主要源于优先消纳因光照强度变化的光伏出力。场景3在低碳、低电价时期[01:00,09:00)动态响应电网碳势、电价波动,通过ESOP灵活调控、储存低碳电能,提升该时期电能需求,显著提高购电量;高碳、高电价时期[09:00,12:00)与[15:00,19:00)光伏出力较大,场景3灵活调节低碳潮流,大幅削减购电量;[12:00,15:00)为高碳时期,但电价有所下调,因此,场景3于该时期购电量有所升高;[19:00,24:00)虽处于低碳时期,但碳势、电价高于[01:00,09:00),场景3依托ESOP双向柔性调控能力,在保障供电可靠性基础上略减少该时期购电量。

场景3通过经济-低碳协同优化机制灵活调节配电网购电量,其以购电成本为代表的综合运行成本与其他场景对比结果如附录B表B2所示。由表B2可知,场景3综合性能最佳:虽购电成本较场景1和场景2分别增加4.75%、3.78%,但碳排放费用降低1.38%、1.08%,园区燃气轮机运维成本下降8.78%、8.51%,网损成本下降20.1%、20.06%。

对比分析表明,场景1、2受限于传统刚性拓扑结构,在潮流与碳流协同调控方面存在灵活性不足现象,向主网购电未协同考虑经济性与低碳性,使EAIP负荷存在低碳能源供给短缺问题,配电网网损成本、园区燃气轮机运维成本及日消耗碳排放量过高;而在场景3中,虽然购电成本高于其他场景,但其余成本的降低抵消购电成本微增与ESOP运维成本,且所安装的ESOP凭借其运行特性,实现潮流和

碳流灵活调控,提升系统运行效率与低碳能源利用率,在维持园区运行稳定的前提下,兼顾FDN的经济性与低碳减排。

同时,场景3通过多组光伏-储能容量对照仿真验证所选容量的优化效果,对照组数据及结果见附录B表B3、B4,结果表明当分布式光伏或储能容量升高时,有效降低FDN综合运行成本及整体碳排放量,实现综合能效的显著提升。

由以上对比成果可知,所提出的方法动态响应主网电价、碳势波动,通过各模块协同低碳优化运行,有效降低系统综合运行成本,提升配电网对清洁能源利用率,实现系统总成本与碳排放双减。

4.2.2 全网节点碳势对比分析

节点碳势可以表征负荷节点消耗单位电量的碳排放量,衡量整个系统的碳排放量。本节对配电网的节点碳势进行分析对比。各个场景下FDN节点实时碳势见附录B图B3。由图可知:园区燃气轮机的机组碳排放强度在系统运行中保持恒定。各场景下园区燃气轮机的实时出力及碳排放总量分别见附录B图B4、表B5。

其中,[01:00,04:00)各场景下园区燃气轮机近乎停运,配电网全网节点碳势与主网碳势保持动态一致;光伏出力渐增趋稳时期[04:00,16:00),各场景光伏接入节点及下游支路6、15、8等的节点碳势呈现下降趋势,光伏接入节点及上游支路3、4、12、13等部分时段同步出现节点碳势下降现象,而场景2、3在局部时段出现燃气轮机出力下降现象;在光伏出力减少时期[16:00,24:00),各场景上游节点碳势降幅小于光伏节点及下游节点,且随着时间变化上述节点碳势逐渐回升至主网碳势,园区燃气轮机持续稳定输出功率。场景3上游支路节点碳势降幅虽小于其他场景,但对EAIP的公共连接节点8的碳势下降幅度显著大于其他场景,为高耗能生产提供低碳电能,同时场景3局部时期内园区燃气轮机出力下降幅度远大于场景2。

上述现象源于光伏机组对配电网节点碳势的影响以及配电网拓扑结构对潮流调控作用。无光照时期[01:00,04:00),园区燃气轮机因机组碳排放强度显著高于主网碳势而近乎停运,各场景仅通过主网购买低碳电能满足整体负荷需求;无光照时期[20:00,24:00),园区燃气轮机出力由EAIP完全消纳,配电网节点碳势仅受主网影响。因此,无光照时期出现全网节点碳势等于主网碳势现象。光伏出力与光伏安装节点及邻近节点碳势呈现反向变化:当光伏出力升高时,节点碳势下降;当光伏出力降低至0时,节点碳势逐渐递增至主网碳势,且因为安装节点与下游节点优先消纳清洁能源,其节点碳势降低

效果比上游支路更显著。场景3借助ESOP在节点5和节点10之间构建的柔性互联通道,将配电网拓扑改造为柔性闭环结构,增强配电网双向柔性灵活调节能力,相比其他场景,降低公共连接节点碳势与园区燃气轮机出力效果显著,以低碳电能满足园区需求,有效削减园区生产碳排放量。在[04:00,09:00),场景3中光伏机组满足节点5的负荷需求后,利用ESOP输送余能降低公共连接节点碳势,补充园区燃气轮机出力骤降引发的功率缺口,导致节点5上游支路节点碳势未出现下降现象;在[09:00,16:00),场景3通过ESOP构建的支路5—10进行清洁电能跨区域传输,在此拓扑影响下,公共连接节点受节点2高碳流与节点10碳流双重影响,考虑功率传输对线路损耗的影响,公共连接节点优先就近消纳来自节点10低碳能源,减少园区碳排放注入,降低全网网损成本,同时场景3通过反向潮流输送实现上游局部时段碳势下降。

综上所述,所提方法通过ESOP、EAIP等系统各部分协同低碳优化,达到最佳降碳效果,有效降低公共连接节点碳势,为电解铝负荷提供低碳能源,实现配电网运行中低碳电能合理使用与整体降碳。

4.2.3 EAIP消耗碳排放量对比分析

EAIP生产用电特性对配电网碳流分布具有显著影响,公共连接节点与园区内供能设备影响园区实时碳排放消耗,各场景对比结果如图6所示。

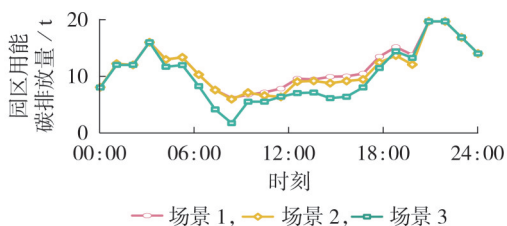


图6 各场景下园区用能碳排放量对比

Fig.6 Comparison of energy-using carbon emissions in park under different scenarios

由图6可知:各场景园区用能碳排放量呈现交替升降波动,[04:00,09:00)出现骤降现象并达到碳排放量最低值,而[09:00,21:00)碳排放量逐渐上升至最高值。其中,场景1碳排放量一直高于其他场景;场景2采用低碳策略,整体略小于场景1碳排放量;场景3光伏出力期间碳排放量显著低于其他场景,并出现电解功率下降现象,其电解铝用能调节情况见附录B图B5。上述现象可归因于:无光照时期园区生产由主网与燃气轮机协同供应,碳排放量受公共连接节点碳势与机组碳排强度双重耦合调控,形成各场景趋同的碳排放量特征。光照充足时期,各场景通过调控潮流与基于热惯性的电解铝负荷灵活响应实现该时期园区碳排放量递减。光伏出力减

少时期,配电网注入功率升高,由于主网处于高碳时期,各场景该时期碳排放量呈现递增趋势。

其中,在光伏出力上升时期[04:00,09:00),主网碳势呈现低碳稳定特征,场景3通过ESOP增加园区低碳电能供应,其园区碳排放量降幅显著高于其他场景,且在09:00时刻达到下降峰值;[09:00,16:00)光伏出力稳定,主网碳势逐渐上升并趋于稳定,电价出现波动,在此期间场景3借助电解槽热惯性,于主网电价-碳势双高峰时期大幅度削减园区生产功率而不影响产量,并通过削减公共连接节点注入功率等措施,实现园区整体碳排放量大幅下降。

由以上对比结果可知,所提方法相比其他场景,在保障EAIP产量的同时,通过削减EAIP负荷需求,优先消纳新能源出力,光照充足时期灵活调控配电网潮流有效降低公共连接节点碳势等措施,大幅削减园区生产消耗的碳排放量及园区生产运维成本,实现EAIP低碳化、经济化生产。

4.2.4 ESOP碳排放流分析

ESOP通过两端换流器对FDN馈线潮流进行灵活调控的同时,其多状态储能装置对FDN潮流、碳流也参与系统调控、消纳新能源出力、平抑FDN负荷波动,提升FDN运行低碳性,ESOP功率流动情况见附录B图B6,ESOP储能装置储电量、虚拟储碳量变化如图7所示。

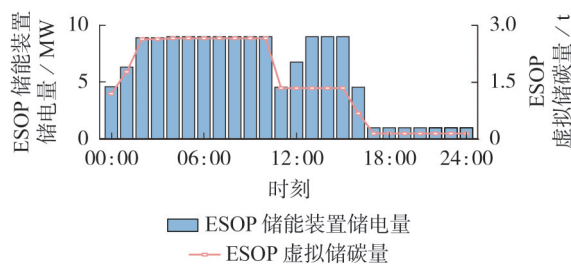


图7 ESOP储能装置储电量、ESOP虚拟储碳量

Fig.7 Energy storage of ESOP energy storage device and virtual carbon storage of ESOP

由图7可知,ESOP持续向节点10注入功率为园区提供清洁电能,其中光照充足时期,园区优先就近消纳新能源出力,导致ESOP注入功率降低。而ESOP储能装置在[01:00,03:00)、[04:00,05:00)、[12:00,14:00)时期处于充电状态,在[11:00,12:00)、[16:00,18:00)时期处于放电状态,其余时期储电量恒定,为离线状态;虚拟储碳量在[01:00,03:00)时期递增,在[11:00,12:00)、[16:00,18:00)时期递减,其余时期维持稳定。

针对上述现象分析其原因:为满足园区大规模负荷与低碳生产需求,通过ESOP灵活调控,将节点5光伏产生的低碳电能储存至ESOP,进而为园区供电,降低园区电解环节碳排放。同时,ESOP储能装

置在主网电价-碳势双低谷时段[01:00, 09:00)调整储能功率, 优先在低谷时段快速充能, 最大化低碳电能捕获, 并在电能达到储能上限后保持离线状态; 主网在[11:00, 12:00)处于电价高峰、碳势升高时期, 储能装置开始放电, 导致储电量、虚拟储碳量快速下降, 并降低配电网系统运行碳排放消耗量与购电成本; [12:00, 14:00)时期, 光伏节点5经ESOP向节点10输送清洁能源供EAIP使用, 其间储能装置处于充电状态, 因此, 该时期储电量递增, 而虚拟储碳量维持不变; 主网于[16:00, 18:00)时期碳势较高, 因此, ESOP储能装置向FDN注入低碳电能, 储电量、虚拟储碳量同步递减。

综上所述, 所提方法验证ESOP储能装置在系统运行中潮流调控及降碳能力, 有效提升FDN源网荷储协同低碳优化运行能力, 实现对低碳电能合理利用, 有效提升系统运行的低碳性。

4.3 改进IEEE 85节点系统仿真验证

为进一步验证所提方法有效性, 本节基于改进IEEE 85节点配电网进行算例分析, 其拓扑结构、光伏装机容量参数详见附录B图B7、表B6, ESOP、EAIP等相关参数及对比场景设置同4.1节。为验证所提方法经济性、低碳性, 给出各场景下系统综合运行成本及碳排放量对比结果, 见附录B表B7。

由表B7可知, 场景3通过ESOP在系统网络层面调用以EAIP为代表的灵活性资源, 充分消纳新能源出力, 削减对主网及燃气轮机的出力需求, 其中购电成本下降1.42%, 燃气轮机运维成本下降2.36%, 相较场景1、2, 总碳排放量分别减少0.84%、0.72%, 实现系统低碳运行。同时, ESOP灵活调控潮流能力提升配电网运行效率, 网损成本下降12.2%, 验证该方法在大型仿真系统中仍可提升配电网新能源消纳能力及运行效率。作为配电网中高耗能负荷, EAIP在不同场景下园区用能碳排放量变化趋势如图8所示。

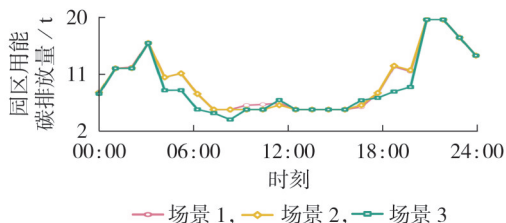


图8 基于改进IEEE 85节点系统的园区碳排放量对比

Fig.8 Comparison of carbon emission value in park based on improved IEEE 85-bus system

由图8可知, 场景3光伏机组出力期间园区碳排放量总体显著降低, 但局部时段与其他场景基本持平, 个别时段碳排放量甚至高于其他场景。上述现

象源于场景3中节点22的光伏机组通过ESOP向EAIP连接节点43传输电能, 以清洁能源部分替代传统能源供给园区负荷, 大幅削减EAIP用能碳排放量, 实现其低碳化生产。其中, 在主网高碳势时段[11:00, 12:00)与[16:00, 17:00), 配电网负荷需求激增触发光伏就地消纳机制, 场景3增加主网购电量满足园区负荷需求, 导致园区碳排放量升高, 且随配电网负荷高峰结束, 光伏出力由ESOP向EAIP传输, 降低其碳排放量; 在[13:00, 16:00), 配电网负荷降低, 主网碳势较低, 园区光伏、燃气轮机联合注入低碳电能满足负荷需求, 导致各场景碳排放量变化幅度较小。

算例验证表明, 场景3有效降低配电网综合运行成本及总碳排放量, 实现系统低碳优化运行与EAIP低碳生产, 验证ESOP灵活调控能力, 证明所提方法在复杂配电网场景下的普适性。

5 结论

为促进电力系统绿色低碳转型, 本文基于碳排放流理论, 构建精细化计及ESOP的FDN碳流计算模型, 实现FDN运行全过程碳排放分布核算, 并考虑ESOP柔性调控特性与电解铝负荷灵活响应能力, 构建以综合运行成本最小为目标的含EAIP的FDN低碳优化运行模型, 通过多组算例场景仿真对比可知: 所提方法依托于上述碳流计算框架与能源管理模型, 基于主网电价、碳势的时序特性与某地实际电解铝生产数据, 通过ESOP、EAIP等各部分动态协同低碳优化调度, 在保证EAIP产能前提下, 挖掘其基于用能时段与电能来源的减碳潜力, 提升新能源消纳能力, 核算FDN碳排放分布, 实现EAIP低碳经济生产, 验证ESOP、EAIP的减碳作用, 提高配电网运行的经济性、低碳性。

附录见本刊网络版(<http://www.epae.cn>)。

参考文献:

- [1] JIANG X, ZHOU Y, MING W L, et al. An overview of soft open points in electricity distribution networks[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2022, 13(3):1899-1910.
- [2] 吴晗, 欧阳森, 梁炜焜, 等. 基于自适应步长ADMM的柔性配电网光-储协同分布鲁棒优化配置[J]. 电力自动化设备, 2023, 43(7):35-43.
- [3] WU Han, OUYANG Sen, LIANG Weikun, et al. Distributionally robust optimization configuration of photovoltaic-energy storage coordination in flexible distribution network based on adaptive step size ADMM[J]. Electric Power Automation Equipment, 2023, 43(7):35-43.
- [4] 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.
- [5] 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.
- [4] JI H R, JIAN J, YU H, et al. Peer-to-peer electricity trading of interconnected flexible distribution networks based on distributed ledger[J]. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 2022, 18(9):5949-5960.
- [5] 马欣梅, 李晓露, 柳劲松, 等. 基于移动储能与配电网协同的低碳鲁棒优化运行策略[J]. *智慧电力*, 2025, 53(8):20-28.
MA Xinmei, LI Xiaolu, LIU Jinsong, et al. Low-carbon robust optimization strategy for coordinated operation of mobile energy storage and distribution networks[J]. *Smart Power*, 2025, 53(8):20-28.
- [6] 蔡欢, 袁旭峰, 熊炜, 等. 柔性互联配电网运行调度研究综述[J]. *智慧电力*, 2022, 50(6):92-99, 106.
CAI Huan, YUAN Xufeng, XIONG Wei, et al. Review on operation scheduling of flexible interconnected distribution network [J]. *Smart Power*, 2022, 50(6):92-99, 106.
- [7] 王越, 谢海鹏, 祝昊. 电解铝工业园区的源荷协同优化配置方法[J]. *电力自动化设备*, 2024, 44(7):132-140.
WANG Yue, XIE Haipeng, ZHU Hao. Source-load coordinated optimal planning method of electrolytic aluminum industrial park [J]. *Electric Power Automation Equipment*, 2024, 44(7):132-140.
- [8] 廖思阳, 张明强, 徐箭, 等. 考虑静态电压稳定约束的电解铝参与电网频率稳定控制方法[J]. *中国电机工程学报*, 2022, 42(18):6727-6740.
LIAO Siyang, ZHANG Mingqiang, XU Jian, et al. Frequency stability control method for electrolytic aluminum participation in power grid considering the static voltage stability constraints[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2022, 42(18):6727-6740.
- [9] 熊文静, 宋啸宇, 袁亮, 等. 基于事件触发自适应MPC的电解铝工业园区孤网多时间尺度优化调度[J]. *电力系统保护与控制*, 2025, 53(22):77-88.
XIONG Wenjing, SONG Xiaoyu, YUAN Liang, et al. Multi-timescale optimal scheduling for isolated electrolytic aluminum industrial parks based on event-triggered adaptive MPC[J]. *Power System Protection and Control*, 2025, 53(22):77-88.
- [10] 廖思阳, 司甜芳, 徐箭, 等. 面向调频辅助服务的电解铝负荷调频容量投标策略[J]. *电力系统自动化*, 2025, 49(15):54-64.
LIAO Siyang, SI Tianfang, XU Jian, et al. Bidding strategy for frequency regulation capacity of electrolytic aluminum loads oriented to frequency regulation ancillary service [J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2025, 49(15):54-64.
- [11] SUN F Z, MA J C, YU M, et al. Optimized two-time scale robust dispatching method for the multi-terminal soft open point in unbalanced active distribution networks [J]. *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, 2021, 12(1):587-598.
- [12] ZHANG T, YU X D, MU Y F, et al. Multiple sources restoration for soft open points in distribution networks with a two-stage accelerated algorithm [J]. *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, 2023, 14(2):892-905.
- [13] LIU W X, FU M D, YANG M Y, et al. A bi-level interval robust optimization model for service restoration in flexible distribution networks [J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2021, 36(3):1843-1855.
- [14] 王要强, 刘世芳, 王义, 等. 基于运行状态分级的柔性互联台区自适应优化调度[J]. *电力自动化设备*, 2024, 44(12):10-17.
WANG Yaoqiang, LIU Shifang, WANG Yi, et al. Adaptive optimal scheduling for flexible interconnected distribution station areas based on operating state classification [J]. *Electric Power Automation Equipment*, 2024, 44(12):10-17.
- [15] 张儒峰, 张玉岳, 姜涛, 等. 基于等效投影的多微电网柔性配电网系统协同优化运行方法[J]. *电力系统自动化*, 2025, 49(12):121-130.
ZHANG Rufeng, ZHANG Yuyue, JIANG Tao, et al. Equivalent projection based cooperative optimal operation method for multi-microgrid flexible distribution system [J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2025, 49(12):121-130.
- [16] GAO C, WANG C W, CHEN Y B, et al. Novel low-carbon optimal operation method for flexible distribution network based on carbon emission flow [J]. *Energy Engineering*, 2025, 122(2):785-803.
- [17] 王皓靖, 郭佩乾, 时珊珊, 等. 中压配电网多台区柔性互联技术应用现状与展望[J]. *电力系统自动化*, 2025, 49(5):13-23.
WANG Haojing, GUO Peiqian, SHI Shanshan, et al. Application status and prospects of flexible interconnection technology for multi-station areas in medium-voltage distribution network [J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2025, 49(5):13-23.
- [18] 王国英, 王成福, 牛远方, 等. 含产消者租赁共享储能的主动配电网协同优化决策[J]. *电力系统自动化*, 2025, 49(1):105-116.
WANG Guoying, WANG Chengfu, NIU Yuanfang, et al. Cooperative optimal decision-making for active distribution network with shared energy storage leased by prosumers [J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2025, 49(1):105-116.
- [19] 茹秋实, 米雪峰, 宋志刚, 等. 考虑储能-智能软开关的主动配电网混合时间尺度鲁棒优化[J]. *中国电力*, 2022, 55(9):129-139.
RU Qiushi, MI Xuefeng, SONG Zhigang, et al. Hybrid-timescale robust optimization in active distribution network with energy storage system-soft open point [J]. *Electric Power*, 2022, 55(9):129-139.
- [20] QIAN T, MING W L, SHAO C C, et al. An edge intelligence-based framework for online scheduling of soft open points with energy storage [J]. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 2024, 15(3):2934-2945.
- [21] SARANTAKOS I, PEKER M, ZOGRAFOU-BARREDO N M, et al. A robust mixed-integer convex model for optimal scheduling of integrated energy storage—soft open point devices [J]. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 2022, 13(05):4072-4087.
- [22] 李思维, 惠恒宇, 包铭磊. 电解铝负荷调节能力量化及参与电网协同调度[J]. *电力系统及其自动化学报*, 2024, 36(9):70-80.
LI Siwei, HUI Hengyu, BAO Minglei. Quantified adjustability of aluminum smelter loads and their participation in coordinated scheduling of power system [J]. *Proceedings of the CSU-EPSA*, 2024, 36(9):70-80.
- [23] SHEN X, SHU H C, FANG Z Y, et al. A grid-generator-electrolytic aluminum multi-agent cooperative game model based on Nash negotiation theory [J]. *IEEE Access*, 2021, 9:140619-140627.
- [24] 廖思阳, 卞士琪, 徐箭, 等. 考虑电解槽能量流优化的电解铝负荷网荷互动可调节容量评估[J]. *中国电机工程学报*, 2025, 45(6):2110-2121.
LIAO Siyang, BIAN Shiqi, XU Jian, et al. Evaluation of grid-load interactive adjustable capacity of electrolytic aluminum load considering optimization of electrolytic cell energy flow [J]. *Proceedings of the CSEE*, 2025, 45(6):2110-2121.
- [25] 岳晓宇, 廖思阳, 付立军, 等. 计及电解铝高耗能负荷调控和火电深调的高比例风电系统分层优化策略[J]. *电网技术*, 2024, 48(8):3186-3196.
YUE Xiaoyu, LIAO Siyang, FU Lijun, et al. Hierarchical optimization strategy of high-penetration wind power system considering electrolytic aluminum energy-intensive load regulation

- and deep peak shaving of thermal power[J]. Power System Technology, 2024, 48(8): 3186-3196.
- [26] LIAO S Y, PI S Q, XU J, et al. Emergency control strategy for electrolytic aluminum load considering the load's transient overcurrent characteristics and transient voltage stability constraints[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2025, 40(2): 1699-1711.
- [27] JIANG Y B, WANG Z, BIAN S Q, et al. Source-load collaborative optimization method considering core production constraints of electrolytic aluminum load [J]. Energies, 2024, 17(24): 6396.
- [28] 丁鑫, 徐箭, 孙元章, 等. 联网型高耗能电解铝工业电网源荷协调平抑风电功率波动控制策略[J]. 电力自动化设备, 2022, 42(11): 47-55.
DING Xin, XU Jian, SUN Yuanzhang, et al. Source-load coordinated control strategy for smoothing wind power fluctuation in grid-connected high energy consuming electrolytic aluminum industrial power grid[J]. Electric Power Automation Equipment, 2022, 42(11): 47-55.
- [29] MORISHIGE T, HAARBERG G M, GUDBRANDSEN H, et al. Effects of composition and temperature on current efficiency for aluminium electrolysis from cryolite-based molten alumina electrolytes[J]. ECS Transactions, 2017, 77(11): 997-1002.
- [30] 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.

作者简介:

张儒峰(1990—), 男, 教授, 博士研究生导师, 通信作者, 主要研究方向为综合能源系统建模、分析与优化运行 (**E-mail**: zhangrufeng@neepu.edu.cn);

庞淞元(1998—), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为配电网优化运行 (**E-mail**: pangsongyuan@aliyun.com);

付麟博(1996—), 女, 博士研究生, 主要研究方向为微电网能量管理与交易 (**E-mail**: fulinbo123@aliyun.com)。

(编辑 王欣竹)

Low-carbon optimal operation of flexible distribution network with electrolytic aluminum industrial park

ZHANG Rufeng, PANG Songyuan, FU Linbo, SUN Haihang, CHEN Houhe

(Key Laboratory of Modern Power System Simulation and Control & Renewable Energy Technology, Ministry of Education, Northeast Electric Power University, Jilin 132012, China)

Abstract: Aiming at the flexible distribution network with soft open point with energy storage system, a low-carbon optimal operation method is proposed for the flexible distribution network with electrolytic aluminum industrial park. Based on the energy consumption and regulation characteristics of electrolytic aluminum production process, considering the interaction ability of production energy in the park, the electricity-carbon coupling model of electrolytic aluminum industrial park is constructed to calculate the real-time carbon emission of the park, and its carbon reduction ability is verified. The operation characteristics of soft open point with energy storage system are analyzed, and the soft open point with energy storage system multi-state electricity-carbon coupling model is constructed based on the carbon emission flow theory to calculate the carbon emission distribution of soft open point with energy storage system. Taking the minimum comprehensive operation cost of the distribution network as the optimization goal, a low-carbon optimization operation model of flexible distribution network with electrolytic aluminum industrial park is proposed, and the multiple operation scenarios are set up for comparison and verification. The case study results show that the proposed method improves the operation economy and low carbon of the distribution network.

Key words: flexible distribution network; electrolytic aluminum industrial park; soft open point with energy storage system; carbon emission flow theory; low-carbon economic dispatch