

新型电力系统多级运行指标协同的电碳 优化控制策略

周万鹏^{1~3}, 李正曦^{1~3}, 杨立滨^{1~3}, 王 恺^{1~3}

(1. 国网青海省电力公司经济技术研究院, 西宁 810008; 2. 国网青海省电力公司清洁能源发展研究院, 西宁 810008;
3. 国网青海省电力公司, 西宁 810008)

摘 要: 针对新型电力系统全网潮流多区域关联的特点, 提出电碳协同运行方式优化方法和电碳协同运行方式动态匹配的新型电力系统全网潮流多区域协同优化方法。首先, 根据新型电力系统子区域多源荷储单元级联的特点, 分析区域内不同源荷储单元的运行调节效率差异, 提出源荷储单元指标梯度协同优化方法。然后, 针对源荷储单元电碳调节特性在不同运行方式下多样化的特点, 研究基于完备状态空间与运行方式反馈的源荷储单元调控参数精细化优化方法, 建立“多重-多核”卷积神经网络模型。最后, 搭建仿真模型进行验证, 仿真结果表明提出的多级指标协同的电碳潮流优化控制策略能有效提升新型电力系统电碳协调能力及电碳调节水平。

关键词: 新型电力系统; 电碳潮流; 协同优化; 优化控制; 卷积神经网络; 运行指标

中图分类号: TM73

文献标志码: A

0 引 言

新型电力系统电碳潮流优化包含新型电力系统全网潮流、新型电力系统子区域、源荷储单元等不同调控层级。新型电力系统全网潮流多区域关联, 子区域内多源荷储间的电碳耦合关系复杂, 源荷储单元电碳调节特性多样多变, 电力系统运行方式及其变化涉及时间空间尺度大, 电碳表征参数指标众多, 电碳耦合机理复杂其全局优化问题难以解析描述和精准求解^[1-2]。文献[3-5]针对超高比例分布式风电光伏等新能源接入配电网的电压波动等问题, 基于新能源出力不确定性建模, 提出配电网最优潮流鲁棒随机优化策略及其卷积神经网络求解算法; 文献[6-8]针对新能源电力系统应对新能源出力及负荷需求不确定下的交直流输电安稳性能提升, 以及系统潮流调节快速响应水平提升等问题, 提出基于交直流不同线路暂态稳定约束动态校正的分布式鲁棒潮流优化模型与算法; 文献[9-11]针对配网新能源最大化消纳及其对应的电压稳定问题, 提出基于配网运行数据循环神经网络拟合新能源出力与电压灵敏度关系模型的配网潮流实时动态优化算法, 并给予此对配网源荷进行优化调度。文献[12-14]针对由于新能源出力与配网负荷需求不确定性带来的潮流不平衡问题, 基于双阶段注意力机制循环神经网络算法提出配网拓扑及潮流约束指标动态修正的配网潮流平衡优化方法。文献[15]考虑电网不确定性和网损的影响, 对碳流优化方法

进行了研究, 有效减少了碳排放量。文献[16]采用节点导纳矩阵分析潮流与碳流之间的关系, 确保潮流追踪结果更加精确。

综上, 现有针对新能源电力系统潮流优化的研究大多集中在提升新能源消纳水平、系统电压稳定性、电网灵活性等方面, 较少涉及对碳排放相关指标及电碳运行特性协同约束下的潮流优化问题。因此, 本文针对新型电力系统电碳潮流优化控制问题, 研究新型电力系统、子区域和源荷储单元 3 个不同调控层级的优化模型; 针对不同调控层级的运行特性和优化控制难点, 分别研究各调控层级的优化控制方法, 建立基于多层级运行及电碳灵活性指标协同的新型电力系统电碳潮流协同优化控制策略。

1 新型电力系统多层级电碳潮流优化控制问题

考虑多能源源网荷储单元耦合接入后的新型电力系统电碳潮流控制在调度流程上存在全网、区域、源荷储单元等不同调控层级。新型电力系统全网潮流优化基于多调度区域间的协调, 实现电能和碳排放从电源到最终多能源形式负荷的传输。电力系统各区域内的多源荷储单元通过输电网络互联, 从电源、储能到负荷逐步完成本区域的电能生成、输运和消费过程。电力系统中的源荷储单元包括风光水火等电源、储电储热储氢等多能源储能、电热气氢等多能源负荷。

收稿日期: 2025-01-24

基金项目: 国家电网有限公司科技项目(52283024000Z)

通信作者: 周万鹏(1994—), 男, 硕士、工程师, 主要从事新型电力系统潮流碳流优化方面的研究。sssss1519042@163.com

电力系统多能源源荷储设备是电网潮流优化基本控制单元。本文将新型电力系统电碳协同运行方式定义为:对于新型电力系统电碳潮流优化问题,其电碳协同运行方式为 $M_{OD}(M_{OD} \in R^{l+n+m})$ (其中 R 为实数空间),指由一定的新能源电源出力与负荷需求状态 $D_{EM}(D_{EM} \in R^l)$ 、各区域电碳运行状态 $O_{MPS}(O_{MPS} \in R^n)$ 和综合电碳特性指标 $I_{PS}(I_{PS} \in R^m)$ 所组成的向量,即:

$$M_{OD} = [D_{EM}^T, O_{MPS}^T, I_{PS}^T]^T \quad (1)$$

式中: D_{EM} ——包含不同种类电源出力比例、备用容量、不同区域间联络线功率、新能源出力、负荷需求状态信息的集合; O_{MPS} ——包括新能源出力不确定性、储能荷能状态、电网各区域间联络线断面指标的集合; I_{PS} ——包括电能质量、供电能效、供电成本、碳减排成本、安稳裕度、能耗、碳排放等指标要求的集合。

由于新型电力系统电碳潮流优化的层次化特点,其优化控制不仅包括电力系统不同层级网络电碳运行状态的优化设定,还包括具体源荷储单元控制参数的闭环调节,以实现全网电碳运行状态的动态优化调控。上述电碳潮流协同优化思想可根据现有电网调控的分层分区策略,具体分为以下3个部分:

1) 新型电力系统全网多区域(包括联络线断面)潮流协同优化:新型电力系统电碳潮流优化问题中,由于不同的风光水火电源发电原理及电力电子并网设备对应的控制策略差异较大,电网各供电区域(及区域间联络线断面)电源配比和碳减排电碳协同运行方式多变,需根据新能源电源出力及负荷需求变化自适应调整各区域(或联络线断面)的电源和储能机组组合优化参数(电能质量、安全约束、供电能效、供电成本、碳排放量、碳减排成本等指标设定值),使各区域(或联络线断面)的电源和储能机组组合优化参数和源荷电碳协调平衡能力相匹配,从而维持电力系统运行的经济低碳和安全高效。

2) 局部调度区域源荷储单元协同优化:电网特定的电网调度区域一般由多个源荷储单元经电力网络互联组成,通过多种能源形式在各源荷储单元中的交互与耦合完成该区域的多能源供能任务。

3) 各源荷储单元电碳运行指标的精准动态控制:新型电力系统全网潮流各区域间的协同优化和单一区域内各源荷储单元间的协同优化的任务主要是优化设定各区域/各源荷储单元间的电碳运行状态参数。为实现全网电碳运行指标的闭环协调控制,全网电碳协调控制等最终环节是对各源荷储单元电碳运行状态及其对应的控制参数进行调节。

2 新型电力系统电碳潮流优化协同优化控制策略

2.1 电碳运行方式动态匹配

对于新型电力系统电碳潮流协同优化问题,在一定的风

光输入和多能源负荷需求条件下,各区域(或联络线断面)电碳运行状态的不同取值将导致各项电力系统电碳运行指标出现较大差异,即在源网荷储电碳特性、电碳潮流约束、电碳运行指标三者之间存在一定的时空关联规律。特定的源网荷储电碳特性、电碳潮流约束、电碳运行指标组合构成了新型电力系统的一个“电碳协同运行方式”。对于由一个或多个区域构成的特定电力系统网络,其运行历史数据中包含大量反映源网荷储电碳特性、电碳潮流约束、电碳运行指标三者间关联信息。因此,从电力系统运行数据中挖掘出电碳运行方式对电碳协同运行特征进行评价,得到最优的电碳协同运行方式匹配可实现各区域(或联络线断面)电碳运行状态的协同优化决策。

新型电力系统在实际运行中所有可能出现的电碳协同运行方式向量组成的空间 Ω 称为电碳协同运行方式空间。对于一定的新能源出力和负荷需求组合,各项电力系统电碳运行指标综合评价最优的电碳协同运行方式称为该条件下的最优电碳协同运行方式,不同生产条件下最优电碳协同运行方式的集合组成了最优电碳协同运行方式库。电碳协同运行方式优化问题为:在电碳协同运行方式空间 Ω 中,通过电碳协同运行方式匹配寻找最优的电碳协同运行方式 M_{OD-opt} ,即当前生产条件下最优的 O_{MPS} ,使得各项电力系统电碳运行指标综合评价最优:

$$\begin{cases} \min J(M_{OD-opt}) \\ \text{s.t. } M_{OD-opt} \in \Omega \end{cases} \quad (2)$$

基于电碳协同运行方式动态匹配的新型电力系统全网潮流多区域协同优化的主要思想是从新型电力系统在实际运行中积累的大量新型电力系统运行数据中挖掘出电碳协同运行方式,形成电碳协同运行方式空间;建立电碳协同运行方式综合评价模型,对某一风光输入和多能源负荷需求条件下的电碳协同运行方式进行评价,具有较优综合指标的电碳协同运行方式为最优电碳协同运行方式,形成了最优电碳协同运行方式库。根据当前的新型电力系统运行条件与状态,通过电碳协同运行方式动态匹配,基于最优电碳协同运行方式推演获取最优电碳协同运行方式,并针对各区域(或联络线断面)电碳运行状态的特点对各区域(或联络线断面)电碳运行状态进行协调,以保证整个系统的综合指标最优。

2.2 子区域源荷储单元电碳指标梯度协同优化

新型电力系统区域通常由多个源荷储单元串联组成,通过各源荷储单元的操作处理完成该区域的电碳运行调节任务。对于新型电力系统子区域,其运行优化本质上是根据其电碳运行指标的目标值合理分配各源荷储单元的生产任务,用最少的电碳灵活性调节成本使得该区域电碳运行指标的实际值尽可能接近其设定值,区域和各源荷储单元的电碳运行指标满足约束,同时尽可能减小子区域和各源荷储单元电碳运行指标的波动。新型电力系统子区域多源荷储单元协

同优化问题的数学可描述为:

$$\left\{ \begin{array}{l} \min_{ips} J_{RPG} = g_{RPG} \left(\left\| g_{FRcost}(i_{ps}(t)), \| o_{mps}(t) - o_{mps}^*(t) \right\|, \right. \\ \left. \left\| o_{mps}(t) - o_{mps}(t-t_{omps}) \right\|, \| i_{ps}(t) - i_{ps}(t-t_{ips}) \| \right) \\ \text{s.t.} \quad \begin{cases} \dot{o}_{mps} = f_{omps}(o_{mps}, i_{ps}, d_{omps}, t) \\ o_{mpsmmin} \leq h_{omps}(o_{mps}) \leq o_{mpsmmax} \\ i_{psmin} \leq h_{ips}(i_{ps}) \leq i_{psmax} \\ o_{mps}(0) = o_{mps0}, i_{ps}(0) = i_{ps0} \end{cases} \end{array} \right. \quad (3)$$

式中: J_{RPG} ——新型电力系统子区域协同优化目标; $g_{RPG}(\cdot)$ ——新型电力系统子区域协同优化函数; $g_{FRcost}(\cdot)$ ——区域反映电碳灵活性调节成本的指标; o_{mps} 、 o_{mps}^* ——新型电力系统子区域电碳运行指标实际值和设定的目标值; $\| o_{mps}(t) - o_{mps}^*(t) \|$ 、 $\| o_{mps}(t) - o_{mps}(t-t_{omps}) \|$ 、 $\| i_{ps}(t) - i_{ps}(t-t_{ips}) \|$ ——该区域电碳运行指标偏离目标的程度、该区域电碳运行指标和各源荷储单元电碳运行指标的波动程度; i_{ps} ——新型电力系统子区域各源荷储单元电碳运行指标; $f_{omps}(\cdot)$ ——该新型电力系统子区域电碳运行指标的动态模型; d_{omps} ——新能源电源和负荷的扰动; $h_{omps}(\cdot)$ 、 $h_{ips}(\cdot)$ —— o_{mps} 、 i_{ps} 对应的约束条件; $o_{mpsmmax}$ 、 i_{psmax} 和 $o_{mpsmmin}$ 、 i_{psmin} ——上述函数的上下限; o_{mps0} 、 i_{ps0} —— o_{mps} 、 i_{ps} 的初始值。

新型电力系统子区域的电碳成本由各源荷储单元的电碳灵活性调节成本组成,且任一源荷储单元的电碳运行状态直接与其相邻的源荷储单元的电碳运行状态密切相关。由于各源荷储单元在区域电力系统中所处的空间位置不同,其发电、充放电、用电特性不同,电碳灵活性调节特性和效率均存在差异,则每个源荷储单元的电碳运行状态都对该区域电碳运行状态和电碳成本产生影响。本文根据不同源荷储单元实时运行特性及其灵活性调节能力间的差异对电碳调节任务进行分配,得到各源荷储单元电碳运行状态的设定值。同时,采用根据不同电力系统区域的电碳调节需求程度,对该区域内的电碳调节资源的运行状态寻找最优运行调节梯度。有上述策略可给出新型电力系统子区域电碳协同优化目标函数为:

$$\min_{F_{RA}} J_{RPG} = g_{RPG}(F_{RA}, F_{Rp}) \quad (4)$$

式中: F_{RA} ——各源荷储单元的电碳灵活性调节范围; F_{Rp} ——各源荷储单元的电碳灵活性调节效率。

通过求解式(4)描述的问题可得电碳运行状态在区域内的最优变化梯度,即每个源荷储单元电碳运行状态的设定值。由于源荷储单元运行特性和源荷平衡状态有关,且各单元中源荷不确定性对电网电力电量平衡的影响存在累积效应,因此首先分析源荷储单元运行不确定性及其持续时间,据此计算源荷储单元在不同时间尺度下的电量和碳排放量调节需求;然后基于初始运行参数及电碳调节需求量化,

采用人工智能算法提取新型电力系统子区域内多维动态特征并基于不同电碳运行工况进行源荷储单元调节能估计;最后根据源荷储单元调节能、源荷储单元不确定性、区域多能源匹配状态、电碳运行状态和各源荷储单元电碳调节范围约束,进行源荷储单元电碳运行状态参数指标优化调整。

在实际的电力系统中,各子区域中多能源源荷匹配状态、电碳运行状态目标值和各源荷储单元效率均是时变的。因此,式(4)的优化问题需进行动态滚动求解。

2.3 源荷储单元电碳运行状态精准控制

源荷储单元是新型电力系统电碳潮流优化的基本生产单元。由于源荷储单元电碳运行状态调控范围窄、工况多变,对新型电力系统电碳运行的动态特性进行分析时需采用目标值调控参数使该源荷储单元电碳运行状态按照最优的变化路径达到其目标值、满足约束且尽可能减小波动是源荷储单元电碳运行状态精准控制的主要问题。源荷储单元动态特性具有多重复杂性。首先,由于新能源电源出力及负荷需求复杂,新能源电源与多能源负荷特性多样,新能源出力与多能源负荷需求间存在复杂的对应和影响关系,且其机理尚未清晰表达;其次,由于风光输入和多能源负荷需求波动频繁,源荷储单元自身状态不断变化,新型电力系统源网荷储组合后的运行方式类型多,不同运行方式呈现不同动态特性且运行方式变化机理复杂;另外,由于电力系统运行时空跨度大、系统运行可靠性要求高、区域间源荷储单元间作用关系复杂且存在数据种类多、数据结构多、数据采用率多、源荷波动及其不确定性存在累积影响等问题。

上述各方面特征均增加了新型电力系统运行控制参数和电碳运行状态之间时空关联关系的复杂性。针对该问题,研究基于源荷储单元动态特性模型、源网荷储电碳协同机理建模、源荷储单元状态动态特性模型,是解决电力系统电碳协同精准调控的关键。

2.3.1 新型电力系统源荷储单元动态特性模型

针对源荷储单元动态特性的多重复杂性,本文将多能源新型电力系统输入、调节特性以及电碳运行状态作为自变量,对新型电力系统实时运行状态进行分析,过程动态特性可表达为:

$$\dot{x}_{eco} = g_{EC}(x_{eco}, n_{edm-IO}, x_{ec-FR}) \quad (5)$$

式中: x_{eco} ——源荷储单元电碳运行状态; g_{EC} —— x_{eco} 关于时间的动态函数; n_{edm-IO} ——多能源新型电力系统输入; x_{ec-FR} ——电碳灵活性资源调节能力。

在完备状态空间的定义下,电碳运行状态的变化是多能源输入和电碳灵活性调节下的综合作用结果;任意时刻过程的电碳运行状态可看作新型电力系统状态空间中的一个点;任意一段时间内的电碳运行状态变化趋势可看作新型电力系统状态空间中的一条轨迹。

2.3.2 电碳运行状态迁移控制策略

为了实现新型电力系统电碳潮流优化,需对新型电力系统源荷储单元进行精准控制,本文基于源荷储单元电碳运行状态迁移控制策略对新型电力系统电碳潮流进行优化,控制策略包括电碳运行状态迁移路径优化和闭环稳定控制两方面内容,选择不同的路径会对源荷储单元电碳运行状态造成不同的影响,以各源荷储单元电碳运行指标波动最小为目标,即:

$$\min_x J_{\text{Reactor}} = E_{\text{Reactor}}(x(t_k)) + \sum_{i=1}^k g_{\text{Reactor}}(x(t_k)) \quad (6)$$

式中: $E_{\text{Reactor}}(x(t_k))$ ——运行状态惩罚函数; k ——路径的分段数; $g_{\text{Reactor}}(\cdot)$ ——迁移动作所产生的源荷储单元电碳运行状态的波动程度、电碳运行状态偏离目标值的程度等。

由于源荷储单元多能源输入波动、闭环控制偏差等影响,该问题需周期性求解。

2.4 “多重-多核”卷积神经网络算法

由于新型电力系统中源荷储单元中能源种类多样,因此需针对不同单元中的不同能源种类,使用不同的卷积核,如电能数据采集频繁使用小卷积核,热能数据采集时间较长使用大卷积核进行计算。因此,本文采用“多重-多核”卷积神经网络算法对新型电力系统电碳潮流优化策略结果进行求解,“多重-多核”卷积神经网络流程图如图1所示。

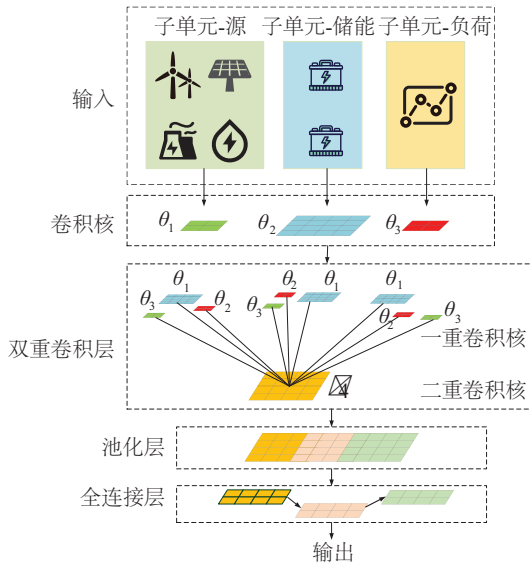


图1 “多重-多核”卷积网络流程

Fig. 1 Flow chart of “multiple-multi-core” convolution network

本文将新型电力系统源荷储单元电碳运行状态以及电碳灵活性资源调节能力作为混合神经网络的输入,由于源荷储各子单元状态变化频率不同,本文设定大、小两种卷积核,分别对各子单元电碳运行状态数据进行卷积,卷积计算是一个线性过程且需非线性函数激活,因此本文提出的混合神经网络中卷积层计算及激活公式为:

$$\lambda_{\text{out}}^i = S \left(\sum_{j=1}^n \sum_{i=1}^n \lambda_{\text{out}}^{i-1} \theta_{m \times n} + b \right) \quad (7)$$

式中: λ_{out}^i ——第 i 层卷积层输出值; $S(\cdot)$ ——激活函数; $\theta_{m \times n}$ —— $m \times n$ 的卷积层; b ——偏置矩阵。

在对各单元源荷储分别进行卷积得到特征向量后输入到二重卷积核中进行局部区域以及全电网数据卷积计算,最终二者卷积计算结果卷积计算后再由池化层进行聚合,通过式(8)提取局部特征,降低特征维数。

$$C = \max \{ \lambda_{11}, \lambda_{12}, \dots, \lambda_{ij} \} \quad (8)$$

式中: λ_{ij} ——卷积层计算后的元素值。

最后,混合神经网络通过全连接层输出新型电力系统电碳潮流优化控制结果。

$$Q_i = S(\omega_{ij} \lambda_{i-1} + b_i) \quad (9)$$

式中: ω_{ij}, b_i ——第 i 层的权重和偏置矩阵。

3 仿真分析

为了验证所提新型电力系统电碳潮流优化协同优化控制策略的有效性,本文选取西北地区某省级电力系统运行数据并采用改进的 IEEE 30 节点系统搭建仿真模型,对新型电力系统电碳协同优化方法进行分析验证。其中,该地区系统光伏、风电、水电和火电的装机容量分别为 800 万、600 万、250 万、200 万 kW。新型电力系统结构如图2所示。该地区系统某一典型日风电、光伏、水电及火电机组出力如图3所示。

本文此处设定两种场景进行对比分析:

场景 1: 采用传统电碳协同控制策略;

场景 2: 采用本文电碳潮流优化协同优化控制策略。

不同场景下的机组出力变化如图4所示。可看出,采用场景 2,即本文电碳潮流协同优化控制策略能有效协调各机

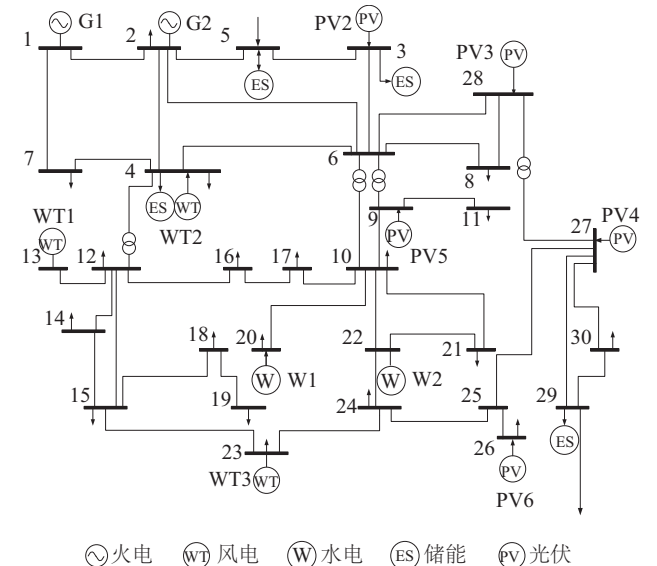


图2 仿真系统

Fig. 2 Simulation system

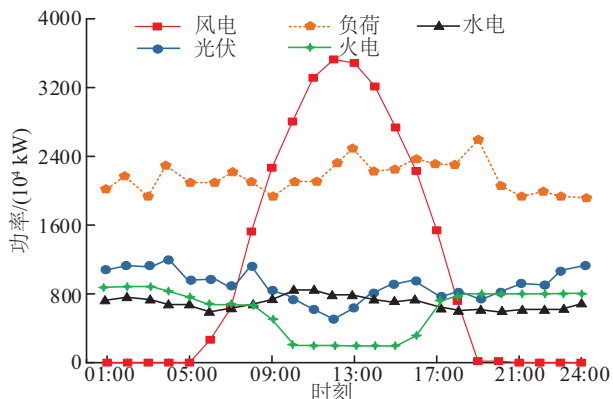
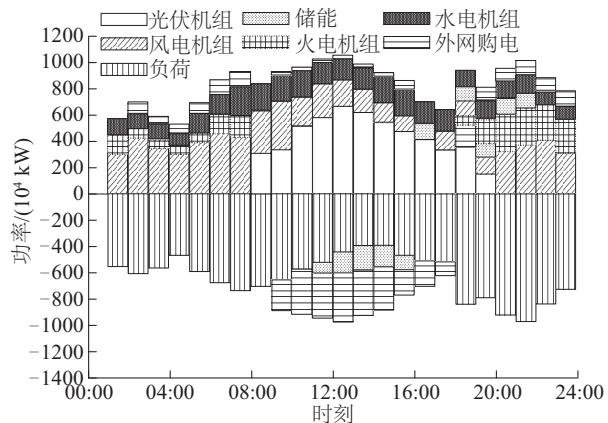


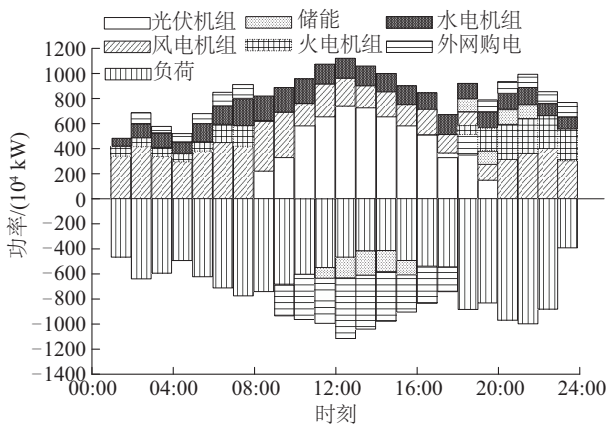
图3 典型日各机组出力

Fig. 3 Output of each unit on typical days

组之间的出力,充分利用新型电力系统中的能源,场景2较场景1减少了18%外网购电功率,降低了21%火电机组输出功率。



a. 场景1



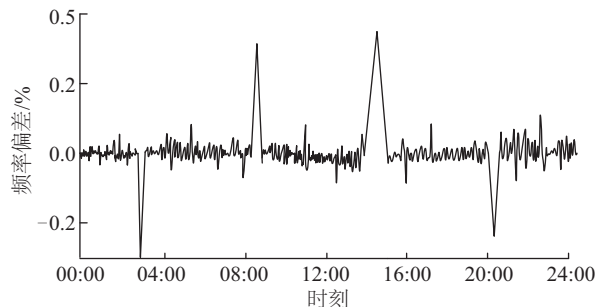
b. 场景2

图4 不同方法下的机组出力

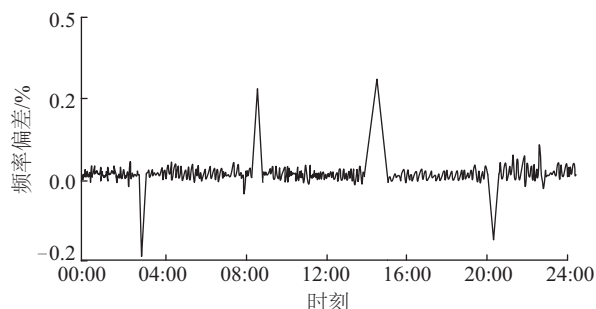
Fig. 4 Output of each unit under different methods

由于新型电力系统中新能源发电占比较高,因此在运行过程中可能会出现频率大幅波动的情况,本文在两种场景下对新型电力系统频率波动情况做以对比分析,结果如图5所示。

示。可看出,场景2下系统整体频率偏差幅值低于场景1,系统频率波动更小,表明本文电碳潮流优化协同优化控制策略有助于提升系统频率的稳定。



a. 场景1



b. 场景2

图5 不同方法下的频率偏差对比结果

Fig. 5 Comparison results of frequency deviation under different methods

为了更直观地展示本文电碳协同优化控制策略的优势,在两种场景下的新能源消纳能力、碳排放量数值以及平均频率波动值如表1所示。可看出,场景2较场景1的新能源消纳能力提升了4.04%,碳排放量降低了26.21%,平均频率波动值降低了0.13%,验证了本文提出的电碳协同优化控制策略的有效性。

表1 不同场景下的优化结果

Table 1 Optimization results under different scenarios

对象	场景1	场景2
新能源消纳能力/%	92.17	96.21
碳排放量/t	3059.82	2257.79
平均频率波动/‰	0.53	0.66

4 结 论

本文针对新型电力系统电碳潮流优化控制问题,结合新型电力系统网络、子区域、源荷储单元等不同层级的电碳运行特性及灵活性调节控制需求,研究了具备新型电力系统多区域电碳协同运行方式协同优化、子区域电碳指标梯度协同优化、源荷储单元多运行方式电碳灵活性精准调控等功能的新电力系统电碳潮流优化协同优化控制策略模型。在西

北地区电力系统基础上建立了电碳潮流协调优化控制仿真模型,对本文提出的电碳协调策略在提高运行方式适应性、供电保障性能、安稳裕度和降低碳排放能耗等方面的效果进行了仿真分析。结果表明,本文提出的新型电力系统电碳协同的潮流优化控制策略能在有效提升碳减排能力的前提下保障良好的供能质量和较为理想的供能成本。

[参考文献]

- [1] 李云鸷, 刘吉臻, 胡阳. 计及低碳响应的综合能源系统多时间尺度源-荷互动优化调度[J]. 太阳能学报, 2024, 45(11): 84-98.
LI Y Z, LIU J Z, HU Y. Multi-time scale source-load interactive optimal scheduling of integrated energy system considering low-carbon demand response[J]. Acta energiae solaris sinica, 2024, 45(11): 84-98.
- [2] 张智刚, 康重庆. 碳中和目标下构建新型电力系统的挑战与展望[J]. 中国电机工程学报, 2022, 42(8): 2806-2818.
ZHANG Z G, KANG C Q. Challenges and prospects for constructing the new-type power system towards a carbon neutrality future[J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(8): 2806-2818.
- [3] 柳思贤, 丁坤, 董海鹰. 考虑碳捕集和电转气的零碳园区综合能源系统经济调度[J]. 太阳能学报, 2024, 45(9): 188-196.
LIU S X, DING K, DONG H Y. Zero-carbon economic dispatch of park integrated energy system considering carbon capture and power to gas[J]. Acta energiae solaris sinica, 2024, 45(9): 188-196.
- [4] 安源, 苏瑞, 郑申印, 等. 计及碳交易和源-荷侧资源的综合能源系统低碳经济优化[J]. 太阳能学报, 2023, 44(11): 547-555.
AN Y, SU R, ZHENG S Y, et al. Low carbon economic optimization of integrated energy system considering carbon trading and source-load side resources [J]. Acta energiae solaris sinica, 2023, 44(11): 547-555.
- [5] 杨浩, 王佳怡, 易文飞, 等. 知识-数据融合驱动的配电网光伏逆变器电压/无功优化自适应控制[J]. 中国电机工程学报, 2025, 45(22): 8691-8705.
YANG H, WANG J Y, YI W F, et al. Hybrid knowledge-data driven adaptive voltage/var optimization control of photovoltaic inverters in distribution networks [J]. Proceedings of the CSEE, 2025, 45(22): 8691-8705.
- [6] 曾子龙, 李勇, 丁心志, 等. 考虑线路动态电热特性的交直流系统分布鲁棒潮流优化策略[J]. 电工技术学报, 2024, 39(21): 6700-6719.
ZENG Z L, LI Y, DING X Z, et al. Distributionally robust power flow optimization strategy for hybrid AC/DC grids considering dynamic electro-thermal properties of lines [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2024, 39(21): 6700-6719.
- [7] 刘昕玥, 王果, 闵永智. 考虑可再生能源消纳的园区碳排放效益优化模型[J]. 太阳能学报, 2024, 45(6): 140-149.
LIU X Y, WANG G, MIN Y Z. Optimization model of carbon emission benefits in industrial parks considering consumption of renewable energy [J]. Acta energiae solaris sinica, 2024, 45(6): 140-149.
- [8] 袁世琦, 潘鹏程, 魏业文, 等. 园区综合能源系统低碳经济优化调度模型研究[J]. 太阳能学报, 2024, 45(3): 347-356.
YUAN S Q, PAN P C, WEI Y W, et al. Study on low-carbon economic optimal scheduling model of community integrated energy system [J]. Acta energiae solaris sinica, 2024, 45(3): 347-356.
- [9] 赵智勇, 李卫军, 郑秒, 等. 基于改进蜉蝣算法的光伏多峰值最大功率跟踪特性研究[J]. 太阳能学报, 2024, 45(12): 77-84.
ZHAO Z Y, LI W J, ZHENG M, et al. Research on photovoltaic multi-peak maximum power tracking characteristics based on improved mayfly algorithm [J]. Acta energiae solaris sinica, 2024, 45(12): 77-84.
- [10] 栗然, 吕慧敏, 彭湘泽, 等. 考虑动态定价和碳交易的多园区综合能源服务商低碳合作优化策略[J]. 太阳能学报, 2024, 45(3): 337-346.
LI R, (LÜ/LV/LU/LYU) H M, PENG X Z, et al. Optimization strategy for low-carbon cooperation of multi-district integrated energy service providers considering dynamic pricing and carbon trading [J]. Acta energiae solaris sinica, 2024, 45(3): 337-346.
- [11] 朱西平, 江强, 钟宇, 等. 计及前瞻风险的综合能源系统低碳经济调度优化[J]. 太阳能学报, 2023, 44(6): 113-121.
ZHU X P, JIANG Q, ZHONG Y, et al. Low-carbon economic dispatch optimization of integrated energy system considering forward-looking risks [J]. Acta energiae solaris sinica, 2023, 44(6): 113-121.
- [12] 李帅虎, 欧阳中, 孙杰懿, 等. 面向沙戈荒区域新能源消纳的电力系统日前低碳调度策略[J]. 太阳能学报, 2024, 45(7): 82-91.
LI S H, OUYANG Z, SUN J Y, et al. Day-ahead low-carbon dispatching strategy of power system for new energy consumption in desert, Gobi and desertification land [J]. Acta energiae solaris sinica, 2024, 45(7): 82-91.
- [13] 徐博涵, 向月, 潘力, 等. 基于深度强化学习的含高比

- 例可再生能源配电网就地分散式电压管控方法[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(22): 100-109.
- XU B H, XIANG Y, PAN L, et al. Local decentralized voltage management of a distribution network with a high proportion of renewable energy based on deep reinforcement learning [J]. Power system protection and control, 2022, 50(22): 100-109.
- [14] 段新会, 黄嵘, 齐传杰, 等. 计及碳交易与需求响应的微能源网双层优化模型[J]. 太阳能学报, 2024, 45(3): 310-318.
- DUAN X H, HUANG R, QI C J, et al. Bi-level optimization model for micro energy grid considering carbon trading and demand response [J]. Acta energiae solaris sinica, 2024, 45(3): 310-318.
- [15] 葛晓琳, 余捷, 符杨, 等. 考虑源荷互动的电力系统随机碳流优化[J]. 中国电机工程学报, 2024, 44(24): 9571-9582.
- GE X L, YU J, FU Y, et al. Stochastic carbon flow optimization of power system considering source-load interaction[J]. Proceedings of the CSEE, 2024, 44(24): 9571-9582.
- [16] 毕瀚文, 范晓舟, 肖海, 等. 支撑电力系统全环节碳流追踪的节点导纳矩阵算法研究[J]. 中国电机工程学报, 2023, 43(20): 7881-7891.
- BI H W, FAN X Z, XIAO H, et al. A node admittance matrix algorithm to support the carbon emission tracing model of whole power system [J]. Proceedings of the CSEE, 2023, 43(20): 7881-7891.

ELECTRIC-CARBON OPTIMIZATION CONTROL STRATEGY WITH MULTI-LEVEL OPERATION INDICATOR COORDINATION IN NEW POWER SYSTEM

Zhou Wanpeng¹⁻³, Li Zhengxi¹⁻³, Yang Libin¹⁻³, Wang Kai¹⁻³

(1. State Grid Qinghai Electric Power Company Economic and Technological Research Institute, Xining 810008, China;

2. State Grid Qinghai Electric Power Company Clean Energy Development Research Institute, Xining 810008, China;

3. State Grid Qinghai Electric Power Company, Xining 810008, China)

Abstract: In view of the characteristics of multi-regional correlation of full-network power flow in the new-type power system, an optimization method for coordinated electricity-carbon operation and a new full-network multi-regional cooperative optimization method for dynamically matching coordinated electricity-carbon operation are proposed. Firstly, according to the characteristics of cascade multi-source load-storage units in sub-regions of the new-type power system, the differences in operational regulation efficiency of various load-storage units within the region are analyzed, and a gradient cooperative optimization method for load-storage unit indicators is proposed. Then, aiming at the diversified characteristics of electricity-carbon regulation of load-storage units under different operating modes, a fine-tuning optimization method for load-storage unit control parameters based on complete state space and operational mode feedback is studied, and a 'multi-level multi-core' convolutional neural network model is established. Finally, a simulation model is constructed for validation. Simulation results show that the proposed multi-level indicator cooperative electricity-carbon power flow optimization control strategy can effectively enhance the electricity-carbon coordination capability and electricity-carbon regulation level of the new-type power system.

Keywords: new power system; electric-carbon flow; collaborative optimization; optimal control; convolutional neural network; operational indicators