

DOI: 10.12158/j.2096-3203.2024.05.008

考虑碳排放流与需求响应的电力系统两阶段优化调度

蔡新雷¹, 董锴¹, 崔艳林¹, 林旭¹, 夏雨星^{2,3}, 余洋^{2,3}

(1. 广东电网有限责任公司电力调度控制中心, 广东 广州 510600;

2. 新能源电力系统全国重点实验室(华北电力大学(保定)), 河北 保定 071003;

3. 河北省分布式储能与微网重点实验室(华北电力大学(保定)), 河北 保定 071003)

摘要:风电接入从发电侧降低了电力系统碳排放,而引入需求响应消纳弃风为负荷侧降碳提供了新思路。文中综合考虑风电和需求响应,基于电力系统碳排放流理论提出日前、日内两阶段电网低碳优化调度方法。首先,分析电力系统碳排放流理论,建立负荷侧的节点碳势模型;其次,将柔性负荷分为可转移负荷和可削减负荷,基于负荷节点碳势模型设计调用这两类负荷降碳的响应机制;然后,建立考虑低碳性和经济性的源荷协调日前优化调度模型,基于模型预测控制求解日前优化调度模型,并通过反馈校正调整日内调度结果。最后,分别通过改进 PJM-5 节点和 IEEE 300 系统进行仿真验证,证明了文中所提优化调度方法能有效促进柔性负荷消纳风电,减少弃风,同时实现负荷侧降碳。

关键词:碳排放流;风电;需求响应;优化调度;柔性负荷;模型预测控制

中图分类号: TM721

文献标志码: A

文章编号: 2096-3203(2024)05-0081-10

0 引言

风电等新能源接入电网减少了火电、燃气等传统机组出力,可从电源侧缓解电力系统节能减排压力^[1-3],但风电出力的不确定性导致弃风时有发生^[4-5]。在“双碳”目标下,低碳减排受到广泛关注^[6-8],若引入需求响应参与风电消纳,不仅能有效减少弃风,还能从负荷侧降低电力系统碳排放。

可见,发电侧调度和负荷侧需求响应均能实现电力系统节能减排,只是当前仍延续削减高耗能机组出力的传统发电侧降碳思路。如文献[9-11]从发电侧碳排放配额出发,建立发电机的碳排放额度和惩罚成本调度模型,通过关闭高耗能机组、增大低耗能机组出力来实现降碳。然而,发电侧调度措施削弱了发电侧的积极性,也难以反映负荷侧的碳排放责任,故对低碳调度的研究逐渐由发电侧延伸到负荷侧,拟通过引导用户的用电行为来深入挖掘负荷侧降碳方式。文献[12-13]建立负荷侧碳交易机制,对用户分配碳排放额度,遵循多卖少买原则,激励用户多参与新能源消纳。为定量精细描述负荷侧的实际碳排放值,建立负荷侧碳交易机制,在碳交易机制下,针对提高前述碳排放额度问题,文献[14]提出基于奖惩因子的季节性碳交易机制,实现系统零碳经济运行。为进一步提高系统运行的低

碳经济性,文献[15]提出多时间尺度优化调度策略,有效提高系统运行的低碳经济性。文献[16-17]进一步引入碳排放流的概念,碳排放流依附于电力系统潮流,通过潮流计算可动态描绘负荷侧的实际碳排放量。在此基础上,文献[18]使用碳排放流量表示负荷侧碳排放量,建立基于 shapley 值的负荷侧碳排放责任分摊机制,同时根据碳责任建立阶梯碳价,形成以碳价为信号引导负荷侧需求响应的调度模型。可见,碳排放流理论为负荷侧降碳提供了一种可行的量化途径,但当前研究未考虑普通负荷和柔性负荷的区别,也未对负荷参与需求响应的方式做任何阐述,研究还不够深入。

综上,文中首先基于碳排放流理论分析负荷侧节点碳排放量;其次设计利用柔性负荷消纳弃风以从负荷侧降低碳排放的响应机制;然后依据精细的碳排放流动模型,考虑低碳性和经济性,建立源荷两侧协调互动的电网日前、日内两阶段优化调度模型;最后基于模型预测控制对日前优化调度模型进行求解,并通过反馈校正优化日内调度结果,从而在保证系统运行经济性的同时实现低碳排放。

1 电力系统碳排放流理论分析

1.1 利用碳排放流理论表征负荷侧碳责任

电力系统碳排放主要来自于火电、燃气等化石能源机组燃烧产生的排放物,故一般将碳排放责任归咎于发电厂侧。但发电厂运行的目的是给负荷供电,发电厂生产的电能通过电力网络最终传输至

收稿日期:2024-03-17;修回日期:2024-05-26

基金项目:国家自然科学基金资助项目(52077078);中国南方电网有限责任公司科技项目(036000KK52220004)

负荷侧,由负荷侧消费电能,因此负荷侧也应是碳排放责任的承担者^[19-20]。为此,文中依据碳排放流理论,将发电机组的碳排放量沿着电力系统网络归算到负荷侧,并对负荷侧碳排放责任进行分摊,同时进一步通过负荷侧优化调度减小弃风,实现节能减排,如图1所示。图1中, z_{12} 、 z_{13} 、 z_{23} 分别为支路1-2、1-3、2-3的阻抗;G1、G2为发电机组。

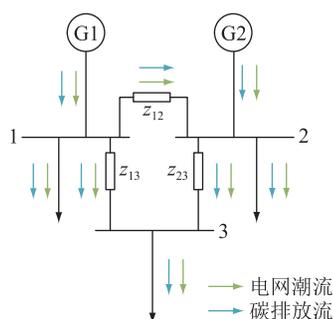


图1 电力系统潮流和碳排放流示意

Fig.1 Schematic diagram of power system flow and carbon emission flow

1.2 碳排放流计算

1.2.1 碳流率

定义单位时间内通过网络节点或支路的能量流所对应的碳排放量为碳流率,记为 R , 单位为 tCO_2/h , 计算如下:

$$R = \frac{dC}{dt} \quad (1)$$

式中: C 为网络节点或支路的能量流; t 为时间。

1.2.2 碳流密度

定义网络中单位电能所对应的碳排放量为碳流密度,记为 ρ , 单位为 $tCO_2/(kW \cdot h)$, 计算如下:

$$\rho = \frac{R}{P} \quad (2)$$

式中: P 为对应网络中的有功潮流。

P 可分为网络节点和传输线路的有功潮流两类,故可将 ρ 分为节点碳流密度和支路碳流密度,其中节点碳流密度又包含发电机节点碳流密度和负荷节点碳流密度。发电机节点碳流密度又被称为发电机碳排放强度,表征机组生产单位电能对应的碳排放量,用 E_G 表示;负荷节点碳流密度又被称为负荷节点碳势,描述负荷消费单位电能对应的碳排放量,用 e 表示。负荷节点碳势大小等效为所有流入该节点的支路碳流密度和与该节点相连发电机的碳排放强度关于潮流加权平均之和,即:

$$e_j = \frac{\sum_{i=1}^N P_{i,j} \rho_{i,j} + P_{G,j} E_{G,j}}{\sum_{i=1}^N P_{i,j} + P_{G,j}} \quad (3)$$

式中: e_j 为负荷节点 j 碳势大小; $P_{i,j}$ 为从节点 i 流入节点 j 的功率; $\rho_{i,j}$ 为节点 i 和节点 j 所连支路的碳流密度; $P_{G,j}$ 为节点 j 所连发电机发电功率; $E_{G,j}$ 为节点 j 所连发电机生产单位电能对应的碳排放量; N 为网络节点数。

2 柔性负荷消纳弃风的降碳响应机制

2.1 柔性负荷分类及运行约束

根据消纳弃风的需求响应要求,将柔性负荷分为可转移负荷和可削减负荷2类。

2.1.1 可转移负荷

可转移负荷是指在保证一个运行周期内总电量不变的情况下,可灵活分配各时段用电量的柔性负荷,定义 L^{tran} 为可转移负荷在周期 T 内转移比例的矩阵。

$$L^{\text{tran}} = [L_1^{\text{tran}} \quad L_2^{\text{tran}} \quad \dots \quad L_t^{\text{tran}} \quad \dots \quad L_T^{\text{tran}}] \quad (4)$$

式中: L_t^{tran} 为第 t 个时段的转移比例, $L_t^{\text{tran}} \in [0, 1]$ 。

假设参与需求响应前可转移负荷功率 P^{retran} 为:

$$P^{\text{retran}} = [P_1^{\text{retran}} \quad P_2^{\text{retran}} \quad \dots \quad P_t^{\text{retran}} \quad \dots \quad P_T^{\text{retran}}] \quad (5)$$

式中: P_t^{retran} 为需求响应前第 t 个时段的可转移功率。

参与需求响应后可转移负荷功率 P^{tran} 为:

$$P^{\text{tran}} = [P_1^{\text{tran}} \quad P_2^{\text{tran}} \quad \dots \quad P_t^{\text{tran}} \quad \dots \quad P_T^{\text{tran}}] \quad (6)$$

式中: P_t^{tran} 为需求响应后第 t 个时段的可转移功率。

根据式(5)、式(6),可求得需求响应前后第 t 个时段可转移负荷功率变化关系为:

$$P_t^{\text{tran}} = (1 - L_t^{\text{tran}}) P_t^{\text{retran}} \quad (7)$$

计及可转移负荷的转移功率和转移时间限制,有如下约束。

(1) 第 t 个时段可转移功率上下限约束。

$$L_t^{\text{tran}} P_{\min}^{\text{tran}} \leq P_t^{\text{tran}} \leq L_t^{\text{tran}} P_{\max}^{\text{tran}} \quad (8)$$

式中: P_{\max}^{tran} 、 P_{\min}^{tran} 分别为最大和最小可转移功率。

(2) 最小转移持续时间约束。

$$\sum_{t=1}^{t+T_{\min}^{\text{tran}}-1} L_t^{\text{tran}} \geq T_{\min}^{\text{tran}} (L_t^{\text{tran}} - L_{t-1}^{\text{tran}}) \quad (9)$$

式中: T_{\min}^{tran} 为可转移负荷的最小转移时间,对其设最小值限制可避免负荷频繁启停造成设备损耗。考虑可转移负荷一个周期内需求响应前后功率不变。

$$\sum_{t=1}^T P_t^{\text{tran}} = \sum_{t=1}^T P_t^{\text{retran}} \quad (10)$$

2.1.2 可削减负荷

可削减负荷是指在一个周期内,可根据需求响应的要求在某一时段内降低功率运行的负荷。定义 L^{cut} 为可削减负荷在周期 T 内削减比例的矩阵。

$$\mathbf{L}^{\text{cut}} = [L_1^{\text{cut}} \ L_2^{\text{cut}} \ \cdots \ L_t^{\text{cut}} \ \cdots \ L_T^{\text{cut}}] \quad (11)$$

式中: L_t^{cut} 为第 t 个时段的削减比例, $L_t^{\text{cut}} \in [0, 1]$ 。

假设参与需求响应前可削减负荷功率 $\mathbf{P}^{\text{recut}}$ 为:

$$\mathbf{P}^{\text{recut}} = [P_1^{\text{recut}} \ P_2^{\text{recut}} \ \cdots \ P_t^{\text{recut}} \ \cdots \ P_T^{\text{recut}}] \quad (12)$$

式中: P_t^{recut} 为需求响应前第 t 个时段的可削减功率。

参与需求响应后可削减负荷功率为:

$$\mathbf{P}^{\text{cut}} = [P_1^{\text{cut}} \ P_2^{\text{cut}} \ \cdots \ P_t^{\text{cut}} \ \cdots \ P_T^{\text{cut}}] \quad (13)$$

式中: P_t^{cut} 为需求响应后第 t 个时段的可削减功率。

根据式(12)、式(13),可求得需求响应前后第 t 个时段可削减负荷功率变化关系为:

$$P_t^{\text{cut}} = (1 - L_t^{\text{cut}}) P_t^{\text{recut}} \quad (14)$$

计及可削减负荷的削减时间和用户满意度限制,有如下约束。

(1) 最小削减持续时间约束。

$$\sum_{t=1}^{t+T_{\min}^{\text{cut}}-1} L_t^{\text{cut}} \geq T_{\min}^{\text{cut}} (L_t^{\text{cut}} - L_{t-1}^{\text{cut}}) \quad (15)$$

式中: T_{\min}^{cut} 为可削减负荷的最小削减时间,对其设最小值限制可避免负荷频繁启停造成设备损耗。

(2) 考虑用户满意度,设置最大连续削减时间 T_{\max}^{cut} 和最大削减次数 N_{\max}^{cut} 约束。

$$\sum_{t=1}^{t+T_{\max}^{\text{cut}}} (1 - L_t^{\text{cut}}) \geq 1 \quad (16)$$

$$\sum_{t=1}^T X_t^{\text{cut}} \leq N_{\max}^{\text{cut}} \quad (17)$$

式中: X_t^{cut} 为表征第 t 个时段是否削减负荷的取值符号,为 1 表示削减,为 0 表示不削减。

2.2 柔性负荷降碳响应过程分析

2.2.1 基本工作过程

作为清洁能源,风力发电不产生碳排放,故当风电沿电力网络流向负荷侧时,消耗风电的负荷的碳排放为零。因此,设置合理的负荷调度策略,使其尽可能消纳风电,可从负荷侧降低系统碳排放。

鉴于风电出力的波动特性^[21-23],类比负荷峰期、谷期的划分方法,将风电按出力大小划分为峰期和谷期,同时借鉴电力系统对负荷“削峰填谷”的调峰原理,提出基于风电出力划分的柔性负荷降碳响应调度策略,具体见图 2。

根据图 2,其工作原理可描述为:根据日前风电出力预测曲线划分风电峰期和谷期;风电峰期,优先调用可转移负荷消纳风电,将负荷从风电谷期转移到峰期以消纳更多的风电,减少弃风,降低碳排放;风电谷期,风电出力减少迫使高碳排放火电机组替代出力,为减少碳排放,除去已经转移到峰期的可转移负荷,通过适度调用可削减负荷减少负荷侧

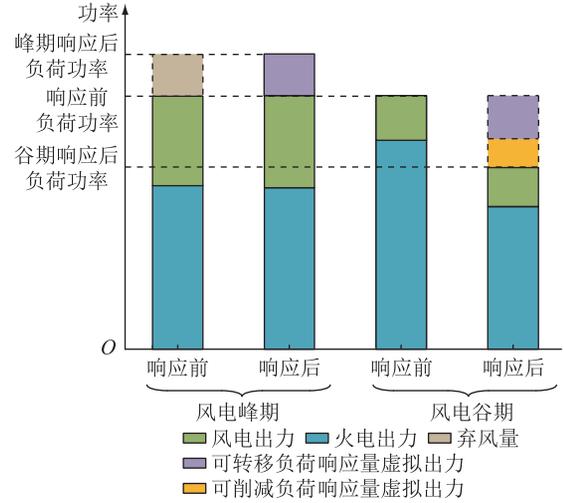


图 2 基于风电出力划分的柔性负荷降碳响应工作过程
Fig.2 Working process of flexible load used to reduce carbon emission based on division of wind power output

功率使得源侧火电机组出力减小。

2.2.2 可转移负荷降碳响应分析

根据柔性负荷降碳响应^[24-25]调度策略,风电接入时利用可转移负荷的降碳响应过程可设计如下。

(1) 利用风电出力预测曲线得到每一时段的预测功率。

$$\mathbf{P}_f = [P_{f,1} \ P_{f,2} \ \cdots \ P_{f,t} \ \cdots \ P_{f,T}] \quad (18)$$

式中: \mathbf{P}_f 为日前风电出力预测值矩阵; $P_{f,t}$ 为第 t 个时段的日前风电出力预测值。

(2) 结合式(3),计算得到日前可转移负荷所在节点碳势。

$$\mathbf{e}_{\text{tran}} = [e_1^{\text{tran}} \ e_2^{\text{tran}} \ \cdots \ e_t^{\text{tran}} \ \cdots \ e_T^{\text{tran}}] \quad (19)$$

式中: \mathbf{e}_{tran} 为周期 T 内可转移负荷所在节点碳势矩阵; e_t^{tran} 为网络中第 t 个时段可转移负荷所在节点的碳势值。

(3) 将每一时段的可转移负荷按照碳势从大到小排序,根据调度需求依次将排序后的负荷转移到风电峰期参与消纳风电,并降低碳排放。

$$\mathbf{e}'_{\text{tran}} = [e_{\max}^{\text{tran}} \ \cdots \ e_t^{\text{tran}} \ \cdots \ e_{\min}^{\text{tran}}] \quad (20)$$

式中: $\mathbf{e}'_{\text{tran}}$ 为周期 T 内按照碳势大小排序的可转移负荷所在节点碳势矩阵; e_{\max}^{tran} 、 e_{\min}^{tran} 分别为可转移负荷所在节点的最大、最小碳势值。

对于上述可转移负荷降碳响应工作过程,简要分析如下:将一个周期内可转移负荷所在节点碳势按照碳势大小降序排列,假设第 t 个时段的节点碳势最高,将优先考虑该时段的可转移负荷消纳风电,若 $P_{f,t} \geq P_t^{\text{tran}}$,则此时风电出力仍有盈余,节点碳势次高的其他时段的可转移负荷参与消纳风电,若 $P_{f,t} < P_t^{\text{tran}}$,则第 t 个时段可转移负荷能完全消纳风电,可转移负荷降碳响应结束。

2.2.3 可削减负荷降碳响应分析

类似可转移负荷降碳响应过程,设计风电接入时可削减负荷降碳响应过程。

(1) 考虑可削减负荷响应后,须重新计算网络节点的负荷节点碳势。

$$\mathbf{e}_{\text{cut}} = [e_1^{\text{cut}} \quad e_2^{\text{cut}} \quad \cdots \quad e_t^{\text{cut}} \quad \cdots \quad e_T^{\text{cut}}] \quad (21)$$

式中: \mathbf{e}_{cut} 为周期 T 内可削减负荷所在节点碳势矩阵; e_t^{cut} 为网络中第 t 个时段可削减负荷所在节点的碳势值。

(2) 将每一时段的可削减负荷按照碳势从大到小依次排序得到 \mathbf{e}'_{cut} ,依据式(15)一式(17)的最小削减时间、最大连续削减时间和最大削减次数约束,按照节点碳势从大到小确定削减容量和时间。

3 两阶段低碳优化调度模型

3.1 两阶段优化调度过程

考虑到风电和负荷的日前预测结果^[26]和实际功率存在偏差,文中基于模型预测控制算法构建日前、日内两阶段优化调度策略,以应对风电及负荷预测误差所带来的功率波动,调度策略流程见图3。

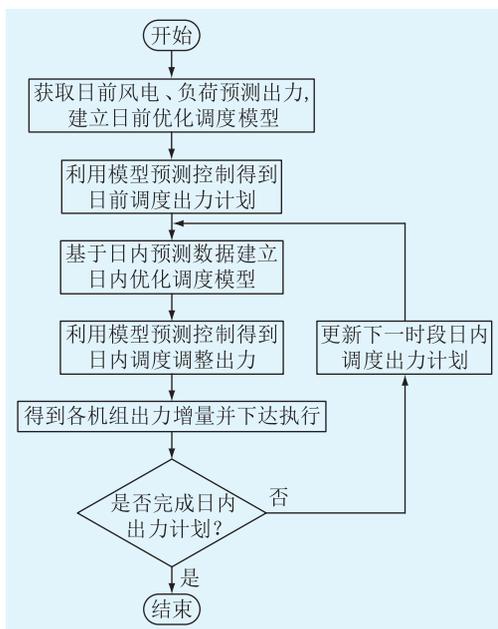


图3 两阶段优化调度策略流程

Fig.3 Flow chart of two-stage optimal scheduling strategy

(1) 获取日前风电、柔性负荷功率预测曲线,以 T 为周期,提取风电、可转移负荷和可削减负荷的出力裕度。

(2) 通过模型预测控制算法求解日前目标函数,得到火电机组和柔性负荷出力,确定日前优化调度出力计划。

(3) 对于日内调度,根据当前时段风电和负荷

的实际出力,基于模型预测算法预测下一时段出力,并更新数据得到下一时段机组和负荷出力。

(4) 在下一时段,重复执行步骤(3)。

3.2 日前优化调度模型

3.2.1 目标函数

考虑电力系统经济性和低碳性,日前优化调度目标函数 C_{total} 包含经济调度成本和低碳调度成本。经济调度成本为机组发电成本 $C_{\text{pg-pw}}$,低碳调度成本为需求响应成本 $C_{\text{cut-tran}}$ 和低碳减排效益 $C_{\text{low-carbon}}$ 之差。因此目标函数为:

$$\min C_{\text{total}} = \min(C_{\text{pg-pw}} + C_{\text{cut-tran}} - C_{\text{low-carbon}}) \quad (22)$$

(1) 机组发电成本 $C_{\text{pg-pw}}$,包括火电和风电机组发电成本、火电机组启停成本和弃风惩罚成本。

$$C_{\text{pg-pw}} = \sum_{t=1}^T \left\{ \sum_{g=1}^G (a_g P_{g,t}^2 + b_g P_{g,t} + c_g) + \sum_{w=1}^W b_w P_{w,t} + \sum_{w=1}^W b_{q,w} P_{q,w,t} + \sum_{g=1}^G [U_{g,t+1}(1 - U_{g,t}) + U_{g,t}(1 - U_{g,t+1})] C_{U,g} \right\} \quad (23)$$

式中: a_g 、 b_g 、 c_g 分别为火电机组 g 的二次项、一次项和常数项煤耗成本系数; G 为火电机组数; b_w 、 $b_{q,w}$ 分别为风电机组 w 的一次项发电成本系数、弃风成本系数; W 为风电机组数; $P_{g,t}$ 、 $P_{w,t}$ 、 $P_{q,w,t}$ 分别为 t 时段火电机组 g 输出功率、风电机组 w 输出功率、弃风功率; $U_{g,t}$ 为表征火电机组 g 在 t 时段开停机状态的变量,取值为0、1; $C_{U,g}$ 为火电机组 g 的启停成本。

(2) 低碳减排效益 $C_{\text{low-carbon}}$,指低碳调度后系统总碳排放降低,交易多余的碳额度带来的收益。

$$C_{\text{low-carbon}} = \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^N c_{\text{emi},i,t} (E_{i,t}^{\text{pre}} - E_{i,t}) \quad (24)$$

式中: $c_{\text{emi},i,t}$ 为 t 时段节点 i 负荷减排效益; $E_{i,t}^{\text{pre}}$ 、 $E_{i,t}$ 分别为 t 时段节点 i 负荷响应前、后总碳排放量。

(3) 需求响应成本 $C_{\text{cut-tran}}$,包含转移负荷和削减负荷补偿成本,结合式(7)和式(14),可得:

$$C_{\text{cut-tran}} = \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^N (c_{\text{cut}} P_{i,t}^{\text{cut}} + c_{\text{tran}} P_{i,t}^{\text{tran}}) = \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^N [c_{\text{cut}}(1 - L_{i,t}^{\text{cut}}) P_{i,t}^{\text{re-cut}} + c_{\text{tran}}(1 - L_{i,t}^{\text{tran}}) P_{i,t}^{\text{re-tran}}] \quad (25)$$

式中: c_{cut} 、 c_{tran} 分别为响应单位功率可削减、可转移负荷的成本系数; $P_{i,t}^{\text{cut}}$ 、 $P_{i,t}^{\text{tran}}$ 分别为 t 时段节点 i 响应后可削减、可转移负荷响应量; $P_{i,t}^{\text{re-cut}}$ 、 $P_{i,t}^{\text{re-tran}}$ 分别为 t 时段节点 i 需求响应前可削减、可转移负荷功

率; $L_{i,t}^{\text{cut}}$ 、 $L_{i,t}^{\text{tran}}$ 分别为 t 时段节点 i 削减、转移比例。

3.2.2 约束条件

(1) 火电机组容量和爬坡约束。

$$P_{g,\min} \leq P_{g,t} \leq P_{g,\max} \quad (26)$$

式中: $P_{g,\max}$ 、 $P_{g,\min}$ 分别为火电机组 g 有功出力最大、最小值。

$$R^{\text{down}} \leq P_{g,t} - P_{g,t-1} \leq R^{\text{up}} \quad t \geq 2 \quad (27)$$

式中: R^{up} 、 R^{down} 分别为爬坡功率的最大、最小值。

(2) 风电机组容量约束。

$$P_{w,\min} \leq P_{w,t} \leq P_{w,\max} \quad (28)$$

式中: $P_{w,\max}$ 、 $P_{w,\min}$ 分别为风电机组 w 有功出力最大、最小值。

(3) 线路潮流上下限约束。

$$P_{L,\min} \leq P_{L,t} \leq P_{L,\max} \quad (29)$$

式中: $P_{L,t}$ 为 t 时段线路 L 的有功功率; $P_{L,\max}$ 、 $P_{L,\min}$ 分别为线路 L 传输功率的最大、最小值。

(4) 柔性负荷约束, 见式 (8) 一式 (10)、式 (15) 一式 (17)。

(5) 节点功率平衡约束。

$$\sum_{g=1}^G P_{g,t} + \sum_{w=1}^W P_{w,t} + P_t^{\text{cut}} + P_t^{\text{tran}} = P_{L,t}^{\text{pre}} \quad (30)$$

式中: $P_{L,t}^{\text{pre}}$ 为 t 时段线路 L 需求响应前负荷功率。

3.3 日内滚动优化调度模型

日内调度模型以 15 min 为间隔进行滚动优化^[27], 选取火电机组出力、可转移负荷转移功率、可削减负荷削减功率以及需求响应后负荷功率构成的向量 $\mathbf{x}(k) = [P_g(k) \ P^{\text{tran}}(k) \ P^{\text{cut}}(k) \ P_L(k)]$ 为状态变量; 以火电机组出力、可转移负荷转移功率以及可削减负荷削减功率增量构成的向量 $\mathbf{u}(k) = [\Delta P_g(k) \ \Delta P^{\text{tran}}(k) \ \Delta P^{\text{cut}}(k)]$ 为控制变量; 以负荷、风电机组超短期预测功率增量构成的向量 $\mathbf{r}(k) = [\Delta P_L(k) \ \Delta P_w(k)]$ 为扰动输入; 以火电机组出力及需求响应后负荷功率构成的向量 $\mathbf{y}(k) = [P_g(k) \ P_L(k)]$ 为输出变量, 则可建立状态空间模型^[28]如下:

$$\begin{cases} \mathbf{x}(k + \Delta t) = \mathbf{A}\mathbf{x}(k) + \mathbf{B}\mathbf{u}(k) + \mathbf{C}\mathbf{r}(k) \\ \mathbf{y}(k) = \mathbf{D}\mathbf{x}(k) \end{cases} \quad (31)$$

$$\text{其中: } \mathbf{A} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & -\Delta t & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}, \quad \mathbf{B} =$$

$$\begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & -\Delta t \\ -1 & -1 & -1 \end{pmatrix}, \quad \mathbf{C} = \begin{pmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 1 & -1 \end{pmatrix}, \quad \mathbf{D} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}。$$

基于风电和负荷的超短期功率预测数据, 将状态空间预测模型反复迭代, 直到向前预测 m 步, 便可得到火电机组和需求响应负荷功率在预测时长 $m\Delta t$ 内的预估输出值构成的向量 \mathbf{Y} 。

$$\mathbf{Y} = [P_g(k + \Delta t) \ P_L(k + \Delta t) \ \dots \ P_g(k + m\Delta t) \ P_L(k + m\Delta t)] \quad (32)$$

取当前时段向前 $m\Delta t$ 时段内, 火电机组出力计划值 P_g^{ref} 和需求响应负荷功率日前计划值 P_L^{ref} 构成的向量 \mathbf{G} 为跟踪控制目标。

$$\mathbf{G} = [P_g^{\text{ref}}(k + \Delta t) \ P_L^{\text{ref}}(k + \Delta t) \ \dots \ P_g^{\text{ref}}(k + m\Delta t) \ P_L^{\text{ref}}(k + m\Delta t)] \quad (33)$$

然后, 以火电机组和需求响应负荷功率预估输出值与日前计划值之间的偏差最小为目标, 便可将日内滚动优化调度转化为二次规划问题。

$$J = (\mathbf{G} - \mathbf{Y})^T \mathbf{H} (\mathbf{G} - \mathbf{Y}) + \mathbf{u}^T \mathbf{Q} \mathbf{u} \quad (34)$$

式中: \mathbf{H} 为火电机组和需求响应负荷功率跟踪误差的权重系数向量; \mathbf{Q} 为权重系数矩阵^[29]。

4 算例分析

4.1 PJM-5 节点算例分析

4.1.1 基础数据

设计改进的 PJM-5 节点系统进行算例分析, 如图 4 所示。其中 G1、G4 为高耗能火电机组, G2、G3 为低耗能火电机组, G5 为风电机组, 火电机组碳排放强度满足 $\mathbf{E}_G = [875 \ 525 \ 820 \ 520]$, 机组基本参数如表 1 所示。节点 B、C、D 所接负荷最大功率分别为 225、225、300 MW。

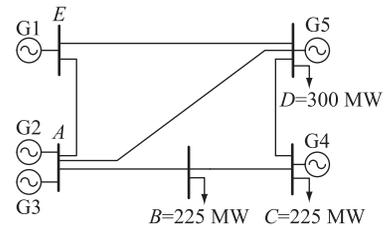


图 4 改进 PJM-5 节点系统

Fig.4 Improved PJM-5 node system

表 1 机组基本参数

Table 1 Basic parameters of the unit

机组	最大出力/MW	二次项成本系数/(美元·MW ⁻²)	一次项成本系数/(美元·MW ⁻¹)	常数项成本系数/美元	碳排放强度/[tCO ₂ ·(MW·h) ⁻¹]
G1	200	0.000 31	12.2	1 000	0.875
G2	110	0.000 48	15.2	920	0.525
G3	420	0.002 00	15.6	700	0.820
G4	200	0.000 71	12.3	480	0.520
G5	350		30		0

考虑风电不确定性,利用模型预测控制算法以 15 min 为间隔进行滚动优化,根据上一时刻预测的风电功率偏差,及时纠正下一时刻功率预测值。文中就风电的实际功率、日前功率预测和日内功率预测结果进行比较分析,如图 5 所示。

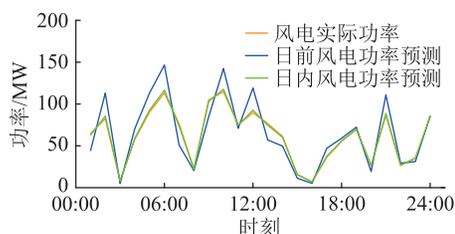


图 5 风电功率预测值对比

Fig.5 Comparison of predicted wind power values

由图 5 可知,风电的不确定性使得日前风电预测偏离实际值,日内使用模型预测控制算法可以很好地跟踪风电功率,避免风电误差影响系统调度结果。根据日内滚动优化得到典型日的风电及负荷预测功率,如图 6 所示。

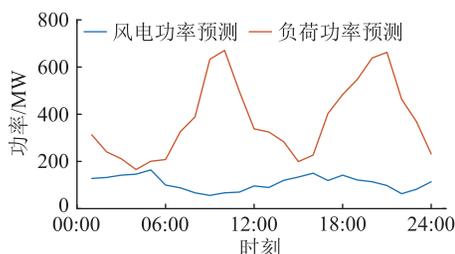


图 6 风电和负荷预测功率

Fig.6 Forecast of wind power and load power

4.1.2 调度结果分析

为验证文中所提低碳调度模型的有效性,设置 3 个场景进行对比。场景 1:无风电接入、不含柔性负荷响应;场景 2:风电接入、不含柔性负荷响应;场景 3:风电接入、柔性负荷响应。对上述场景的调度结果进行分析,如表 2 所示。

表 2 PJM-5 节点各场景调度成本

Table 2 PJM-5 node scheduling costs for each scenario

场景	经济成本/ 美元	低碳成本/ 美元	碳排放 量/t	总成本/ 美元
1	21 008	0	6 241	21 008
2	24 680	-1 102	5 840	23 578
3	20 553	-1 600	5 362	18 953

由表 2 可知,与场景 1 相比,风电接入后,风电代替一部分火电机组出力,因此场景 2 的碳排放量减少 6.43%,从而产生低碳减排效益 1 102 美元,不考虑负荷侧响应时,由于风电不确定性,弃风产生的惩罚成本使得经济成本相较场景 1 增加 3 672

美元,最终使得总成本增加 12.23%,说明引入风电减少碳排放,但是产生的弃风成本会增加经济成本,不利于经济性;场景 3 在场景 2 的基础上考虑了柔性负荷低碳响应,能够消纳风电,使得系统碳排放量进一步减少 8.22%,低碳效益增加 498 美元,同时弃风成本降低使得经济成本减少 4 127 美元。综上,风电接入可以缓解系统碳排放压力,但是风电的运行和弃风惩罚成本使得经济性降低,在负荷侧引入低碳响应后,可转移负荷能有效消纳弃风,可削减负荷可以减少负荷侧碳排放,从而验证了风电和柔性负荷配合可以兼顾低碳性和经济性,实现经济低碳调度。

(1) 场景 1 下,在 PJM-5 节点系统中不考虑风电机组接入,系统仅含有火电机组,式(22)的目标函数为经济调度成本最低,通过模型预测控制算法进行求解,得到火电机组出力和负荷节点碳排放量,如图 7、图 8 所示。

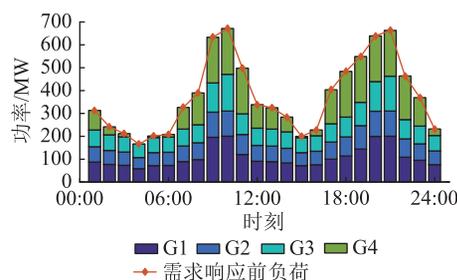


图 7 场景 1 下各机组出力

Fig.7 Output of each unit in scenario 1

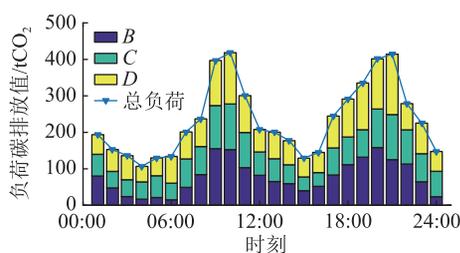


图 8 场景 1 下各负荷节点碳排放值

Fig.8 Carbon emission for each load node in scenario 1

由图 7 和图 8 可知,负荷碳排放值受负荷功率影响,与负荷功率成正相关。例如在图 7 中 09:00—11:00、19:00—21:00 内负荷用电处于高峰期,火电机组出力也到达峰值,碳流依附于潮流沿着网络归算到负荷侧,使得负荷总碳排到达峰值,负荷和碳排放谷期同理。

(2) 场景 2 下,在 PJM-5 节点系统中接入风电机组,通过模型预测控制算法进行求解,得到火电机组出力和负荷节点碳排放量,如图 9、图 10 所示。

由图 7 和图 9 对比可知,风电接入系统后可代

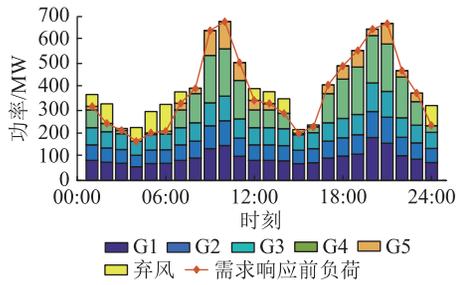


图9 场景2下各机组出力

Fig.9 Output of each unit in scenario 2

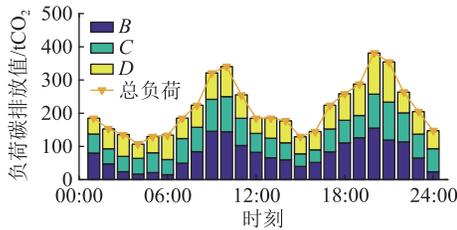


图10 场景2下各负荷节点碳排放值

Fig.10 Carbon emission for each load node in scenario 2

替一部分火电机组出力,考虑到风电零碳排放,风电出力时段的负荷侧碳排放值明显降低,例如图9中风电在09:00—12:00、17:00—19:00以及21:00出力较大;对比图8可知,图10中各负荷节点在上述时段的碳排放值明显减小,说明风电接入能有效缓解负荷侧碳排放,但是图10中不考虑负荷侧响应,弃风值也较大,由式(22)可知,弃风惩罚成本增大使得经济成本增多,不利于系统经济调度。因此,仅有风电接入而无负荷侧响应时,一定程度满足了低碳性,但难以兼顾经济性。

对比图8和图10中09:00—11:00、17:00—19:00时各负荷节点碳排放值可知,相较于负荷节点B、C,接入风电后负荷节点D的碳排放值降低最明显,这是因为风电和负荷在同一节点上,根据就近消纳原则,负荷节点D吸收风电功率更多,碳排放值降低最多。

(3) 场景3下,设置所有负荷中30%为柔性负荷,其中可转移和可削减负荷占比分别为70%和30%。场景3下,火电机组出力 and 负荷节点碳排放量如图11、图12所示,图13为需求响应前后负荷功率变化情况。考虑需求响应后,负荷节点B、C、D的柔性负荷参与消纳风电,对比图10,可见图12中所有负荷碳排放值均整体降低。根据图13中需求响应前后各个时段的负荷功率大小,计算出日内参与需求响应的可转移负荷和可削减负荷功率分别为391.68、48.96 MW,分别占总负荷的6.12%、0.77%。由此可知,负荷侧低碳响应调度中削减、转

移负荷占总负荷比例较低,能够较好地达到用户满意度要求。

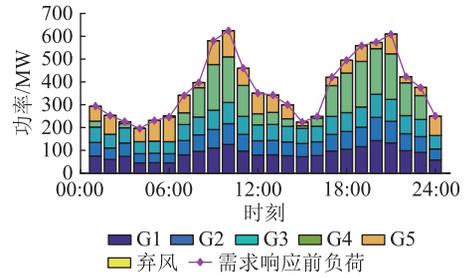


图11 场景3下各机组出力

Fig.11 Output of each unit in scenario 3

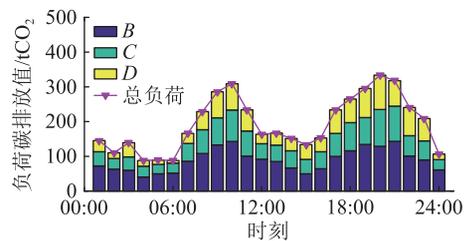


图12 场景3下各负荷节点碳排放值

Fig.12 Carbon emission for each load node in scenario 3

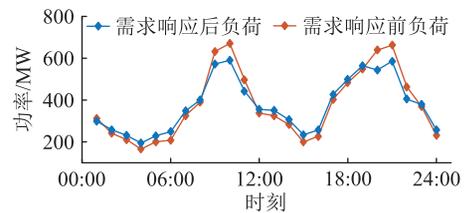


图13 需求响应前后负荷功率变化

Fig.13 Load power change before and after demand response

由图11和图12对比可知,除负荷功率外,负荷碳排放值还受节点碳势影响,节点碳势越高,负荷碳排放值越大。例如由图11可知,01:00—04:00时段内负荷功率不断降低,但是图12中03:00的碳排放值大于其余时段,这是由于03:00时风电功率最小,火电机组代替零碳势的风电出力,火电机组出力增多,使得系统整体碳势升高,最终碳排放值增大。

由图11—图13可知,当柔性负荷参与低碳响应,系统存在弃风时,柔性负荷可转移至该时段,消纳弃风。例如由图13可知,负荷功率在09:00—11:00、19:00—23:00内降低,其中柔性负荷参与削减和转移至其他时段,这是由于上述时段的风电在需求响应前已全部消纳,依据柔性负荷的降碳响应机制,可转移负荷转移到02:00—06:00、13:00—16:00,参与消纳弃风,由图11可以看出,负荷转移

至上述时段后弃风被有效消纳,可削减负荷降低负荷功率,减少火电机组出力,最终使得总负荷碳排放值降低。综上,在风电接入后柔性负荷响应一方面可以减少弃风惩罚成本,保证经济性,另一方面能够进一步降低系统碳排放,兼顾低碳性。

4.2 IEEE 300 节点算例分析

将文中经济低碳调度模型代入 IEEE 300 节点算例进行分析,同样设置无风电和柔性负荷响应、风电接入、风电和柔性负荷同时响应 3 个场景,调度结果如表 3 所示。

表 3 IEEE 300 节点各场景调度成本
Table 3 IEEE 300-node scheduling costs for each scenario

场景	经济成本/ 美元	低碳成本/ 美元	碳排放 量/t	总成本/ 美元
1	1 255 440	0	262 122	1 255 440
2	1 579 520	-61 712	227 760	1 517 808
3	1 215 392	-99 200	193 032	1 116 192

由表 3 可知,与场景 1 相比,风电接入后,场景 2 的碳排放量减少 13.11%,由此产生低碳减排效益 61 712 美元,由于弃风惩罚最终使得总成本增加 20.90%,进一步证明仅引入风电后不利于系统经济性;场景 3 考虑柔性负荷低碳响应后能够消纳风电,系统碳排放量进一步减少 15.24%,低碳效益增加 37 488 美元,经济成本减少 364 128 美元。综上,IEEE 300 节点算例分析进一步验证了风电和柔性负荷配合后可以兼顾低碳性和经济性,实现经济低碳调度。

综上,文中基于模型预测控制的日前、日内两阶段优化调度模型实现了风电消纳,减少了碳排放,缓解了系统运行的环境压力。

5 结论

结合电力系统碳排放流模型,文中建立了考虑风电和需求响应的电网日前、日内两阶段运行调度策略,以改进的 PJM-5 节点系统为例进行仿真,并在 IEEE 300 节点系统中验证了模型的有效性,得到以下结论:

(1) 碳排放流理论将发电侧的碳排放沿着电力网络传输到负荷侧,通过调整负荷侧的用电行为可有效消纳风电,减少碳排放值。仿真结果表明,接入风电和需求响应后系统碳排放减少了 14.08%。

(2) 日前、日内两阶段模型可以实现源荷两侧的功率平衡、保证系统的稳定运行,同时能有效兼顾系统的经济性和低碳性。仿真结果表明,相较于于

场景 1,场景 3 的调度模型总成本降低了 9.78%。

在此基础上,后续研究拟在源侧增加考虑光伏、水电等清洁能源,同时在荷侧建立碳排放交易机制,引导更多负荷参与消纳新能源,实现源荷互动、节能减排。

参考文献:

- [1] ZHOU X F, CAI C Y, LI Y J, et al. A robust optimization model for demand response management with source-grid-load collaboration to consume wind-power[J]. Global Energy Interconnection, 2023, 6(6): 738-750.
- [2] 刘子旭, 米阳, 卢长坤, 等. 计及需求响应和风力发电消纳的电-热系统低碳优化调度[J]. 上海交通大学学报, 2023, 57(7): 835-844.
LIU Zixu, MI Yang, LU Changkun, et al. Low-carbon optimal dispatch of electric-thermal system considering demand response and wind power consumption[J]. Journal of Shanghai Jiao Tong University, 2023, 57(7): 835-844.
- [3] 严中华, 王建功, 朱英刚, 等. 考虑碳排放流理论的风-碳捕集-电转气联合新型中长期调度方式[J]. 智慧电力, 2022(6): 14-21.
YAN Zhonghua, WANG Jianguo, ZHU Yinggang, et al. New medium-long term dispatching mode of wind-carbon capture P2G combined system considering carbon emission flow theory [J]. Smart Power, 2022(6): 14-21.
- [4] 崔杨, 邓贵波, 赵钰婷, 等. 考虑源荷低碳特性互补的含风电电力系统经济调度[J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(14): 4799-4815.
CUI Yang, DENG Guibo, ZHAO Yuting, et al. Economic dispatch of power system with wind power considering the complementarity of low-carbon characteristics of source side and load side[J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(14): 4799-4815.
- [5] 曾丹, 姚建国, 杨胜春, 等. 应对风电消纳中基于安全约束的价格型需求响应优化调度建模[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(31): 5571-5578.
ZENG Dan, YAO Jianguo, YANG Shengchun, et al. Optimization dispatch modeling for price-based demand response considering security constraints to accommodate the wind power[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(31): 5571-5578.
- [6] 窦真兰, 杜凤青. 电力系统节能策略和方法分析[J]. 新型工业化, 2015, 5(10): 1-6.
DOU Zhenlan, DU Fengqing. Research on the energy-saving strategies and the methods for power system[J]. The Journal of New Industrialization, 2015, 5(10): 1-6.
- [7] 张帅泽, 王丹, 贾宏杰, 等. 基于 IGDT 理论的电-热耦合系统低碳扩展规划[J]. 全球能源互联网, 2023(5): 512-528.
ZHANG Shuaize, WANG Dan, JIA Hongjie, et al. Low-carbon expansion planning of electric thermal coupling system based on IGDT theory [J]. Journal of Global Energy Interconnection, 2023(5): 512-528.
- [8] 周立志, 张鹏飞, 麻常辉, 等. 南非碳中和实现路径及减排措施研究[J]. 全球能源互联网, 2022, 5(1): 85-96.

- ZHOU Lizhi, ZHANG Pengfei, MA Changhui, et al. Study on carbon neutrality pathway and emission reduction measures in South Africa [J]. *Journal of Global Energy Interconnection*, 2022, 5(1): 85-96.
- [9] 肖勇, 戚锦通, 胡伟, 等. 基于双层规划模型的燃煤发电机组初始碳排放配额分配方案研究 [J]. *热力发电*, 2022, 51(10): 42-46.
- XIAO Yong, QI Jintong, HU Wei, et al. Initial carbon emission quota allocation scheme for coal-fired power units based on bi-level programming model [J]. *Thermal Power Generation*, 2022, 51(10): 42-46.
- [10] 刘洁丽. 发电机组碳排放成本的核算方法及在生命周期成本分析中的应用 [D]. 杭州: 浙江大学, 2018.
- LIU Jieli. Accounting method of carbon emission cost of generator set and its application in life cycle cost analysis [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2018.
- [11] 吉斌, 昌力, 陈振寰, 等. 基于区块链技术的电力碳排放权交易市场机制设计与应用 [J]. *电力系统自动化*, 2021, 45(12): 1-10.
- JI Bin, CHANG Li, CHEN Zhenhuan, et al. Blockchain technology based design and application of market mechanism for power carbon emission allowance trading [J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2021, 45(12): 1-10.
- [12] 张勇, 范斯达, 高海荣, 等. 融合柔性负荷和碳交易机制的矿山综合能源系统运行优化 [J]. *电力系统及其自动化学报*, 2023, 35(4): 148-158.
- ZHANG Yong, FAN Sida, GAO Hairong, et al. Operation optimization of coal mine integrated energy system integrating flexible load and carbon trading mechanism [J]. *Proceedings of the CSU-EPSA*, 2023, 35(4): 148-158.
- [13] 陈锦鹏, 胡志坚, 陈嘉滨, 等. 考虑阶梯式碳交易与供需灵活双响应的综合能源系统优化调度 [J]. *高电压技术*, 2021, 47(9): 3094-3104.
- CHEN Jinpeng, HU Zhijian, CHEN Jiabin, et al. Optimal dispatch of integrated energy system considering ladder-type carbon trading and flexible double response of supply and demand [J]. *High Voltage Engineering*, 2021, 47(9): 3094-3104.
- [14] 颜宁, 马广超, 李相俊, 等. 基于季节性碳交易机制的园区综合能源系统低碳经济调度 [J]. *中国电机工程学报*, 2024, 44(3): 918-932.
- YAN Ning, MA Guangchao, LI Xiangjun, et al. Low-carbon economic dispatch of park integrated energy system based on seasonal carbon trading mechanism [J]. *Proceedings of the CSEE*, 2024, 44(3): 918-932.
- [15] 王炼, 窦真兰, 吴珠瑛, 等. 计及碳交易机制的区域综合能源系统多时间尺度优化调度 [J]. *上海节能*, 2022(12): 1501-1513.
- WANG Lian, DOU Zhenlan, WU Zhuying, et al. Multi-time scale optimization scheduling of RIES considering carbon trading mechanism [J]. *Shanghai Energy Conservation*, 2022(12): 1501-1513.
- [16] 周天睿, 康重庆, 徐乾耀, 等. 碳排放流在电力网络中分布的特性与机理分析 [J]. *电力系统自动化*, 2012, 36(15): 39-44.
- ZHOU Tianrui, KANG Chongqing, XU Qian Yao, et al. Analysis on distribution characteristics and mechanisms of carbon emission flow in electric power network [J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2012, 36(15): 39-44.
- [17] WANG Y Q, QIU J, TAO Y C, et al. Carbon-oriented operational planning in coupled electricity and emission trading markets [J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2020, 35(4): 3145-3157.
- [18] 陈厚合, 茅文玲, 张儒峰, 等. 基于碳排放流理论的电力系统源-荷协调低碳优化调度 [J]. *电力系统保护与控制*, 2021, 49(10): 1-11.
- CHEN Houhe, MAO Wenling, ZHANG Rufeng, et al. Low-carbon optimal scheduling of a power system source-load considering coordination based on carbon emission flow theory [J]. *Power System Protection and Control*, 2021, 49(10): 1-11.
- [19] 汪超群, 陈懿, 迟长云, 等. 基于潮流分布矩阵的电力系统碳排放流计算方法 [J]. *科学技术与工程*, 2022, 22(12): 4835-4842.
- WANG Chaoqun, CHEN Yi, CHI Changyun, et al. Calculation method of power system carbon emission flow based on power flow distribution matrix [J]. *Science Technology and Engineering*, 2022, 22(12): 4835-4842.
- [20] 汪超群, 陈懿, 文福拴, 等. 电力系统碳排放流理论改进与完善 [J]. *电网技术*, 2022, 46(5): 1683-1691.
- WANG Chaoqun, CHEN Yi, WEN Fushuan, et al. Improvement and perfection of carbon emission flow theory in power systems [J]. *Power System Technology*, 2022, 46(5): 1683-1691.
- [21] 傅旭, 王进军, 张雨津, 等. 含多类型电源的电力系统光热发电效益评估方法 [J]. *电力工程技术*, 2022, 41(1): 213-218.
- FU Xu, WANG Jinjun, ZHANG Yujin, et al. Benefit evaluation of CSP in power system with multiple types of power sources [J]. *Electric Power Engineering Technology*, 2022, 41(1): 213-218.
- [22] 江叶峰, 周海强, 罗建裕, 等. 计及源荷区间不确定性的电力系统日前优化调度 [J]. *电力工程技术*, 2022, 41(4): 58-66.
- JIANG Yefeng, ZHOU Haiqiang, LUO Jianyu, et al. Day-ahead optimal dispatch of power system considering source and load interval uncertainties [J]. *Electric Power Engineering Technology*, 2022, 41(4): 58-66.
- [23] 曹建伟, 陈文进, 沈诚亮, 等. 计及风力资源的风电场出力研究 [J]. *浙江电力*, 2022, 41(6): 45-53.
- CAO Jianwei, CHEN Wenjin, SHEN Chengliang, et al. Research on output of a wind farm considering wind resources [J]. *Zhejiang Electric Power*, 2022, 41(6): 45-53.
- [24] 金国锋, 邢敬舒, 张林, 等. 考虑用户舒适度的蓄热式电采暖参与风电消纳的多目标优化 [J]. *电力建设*, 2022, 43(3): 12-21.

- JIN Guofeng, XING Jingshu, ZHANG Lin, et al. Multi-objective optimization of wind power accommodation with regenerative electric heating considering user comfort [J]. *Electric Power Construction*, 2022, 43(3): 12-21.
- [25] 李姚旺, 张宁, 杜尔顺, 等. 基于碳排放流的电力系统低碳需求响应机制研究及效益分析[J]. *中国电机工程学报*, 2022, 42(8): 2830-2842.
- LI Yaowang, ZHANG Ning, DU Ershun, et al. Mechanism study and benefit analysis on power system low carbon demand response based on carbon emission flow[J]. *Journal of China Electrical Engineering*, 2022, 42(8): 2830-2842.
- [26] GUO P H, RIVERA D E, DONG Y W, et al. Optimizing behavioral interventions to regulate gestational weight gain with sequential decision policies using hybrid model predictive control [J]. *Computers & Chemical Engineering*, 2022, 160(4): 10-21.
- [27] 虞临波, 寇鹏, 冯玉涛, 等. 风储联合发电系统参与频率响应的模型预测控制策略[J]. *电力系统自动化*, 2019, 43(12): 36-43.
- YU Linbo, KOU Peng, FENG Yutao, et al. Model predictive control strategy for combined wind-storage system to participate in frequency response[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2019, 43(12): 36-43.
- [28] 叶林, 路朋, 赵永宁, 等. 含风电电力系统有功功率模型预测控制方法综述[J]. *中国电机工程学报*, 2021, 41(18): 6181-6197.
- YE Lin, LU Peng, ZHAO Yongning, et al. Review of model predictive control for power system with large-scale wind power grid-connected[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2021, 41(18): 6181-6197.
- [29] LIU J Z, YAO Q, HU Y. Model predictive control for load frequency of hybrid power system with wind power and thermal power[J]. *Energy*, 2019, 172: 555-565.

作者简介:



蔡新雷

蔡新雷(1986),男,硕士,高级工程师,从事电力系统运行与控制相关工作(E-mail: 517665114@qq.com);

董锴(1983),男,硕士,工程师,从事电力系统运行与控制相关工作;

崔艳林(1987),男,硕士,工程师,从事电力系统运行与控制相关工作。

Two-stage optimal dispatch of power system considering carbon emission flow and demand response

CAI Xinlei¹, DONG Kai¹, CUI Yanlin¹, LIN Xu¹, XIA Yuxing^{2,3}, YU Yang^{2,3}

(1. Electric Power Dispatching Control Center of Guangdong Grid Co., Ltd., Guangzhou 510600, China;

2. State Key Laboratory of Alternate Electrical Power System With Renewable Energy Sources (North China Electric Power University), Baoding 071003, China; 3. Key Laboratory of Distributed Energy

Storage and Microgrid of Hebei Province (North China Electric Power University), Baoding 071003, China)

Abstract: The access of wind power reduces the carbon emissions of the power system from the generation side, and the introduction of demand response to eliminate wind abandonment provides a new idea for carbon reduction from the load side. Considering wind power and demand response comprehensively, based on the theory of carbon emission flow of power system, a day-ahead and day-in two-stage low carbon optimal dispatching method for power grid is proposed. Firstly, the carbon emission flow theory of power system is analyzed, and the node carbon potential model of load side is established. Then, the flexible load is divided into two types, transferable load and reducible load. Based on the carbon potential model of load nodes, the response mechanism of calling these two types of loads to reduce carbon is designed. On this basis, the source load coordination day-ahead optimal scheduling model considering low-carbon and economic is established. Based on model predictive control, the day-ahead optimal scheduling model is solved, and the day-ahead scheduling results are changed through feedback correction. Finally, the simulation results of the improved PJM-5 node system and IEEE 300-node system show that the proposed optimal scheduling method can effectively promote the flexible load to absorb wind power, and reduce wind abandonment, and achieve the goal of load side carbon reduction.

Keywords: carbon emission flow; wind power; demand response; optimal dispatch; flexible load; model predictive control

(编辑 方晶)