第 49 卷 第 6 期：2318-2330 高电压技术 Vol.49, No.6: 2318-2330
2023 年 6 月 30 日 High Voltage Engineering June 30, 2023
DOI: 10.13336/j.1003-6520.hve.20230216

基于节点碳势的配电网分布式资源低碳调度策略

宋泽渥[1]，冯　华[2]，陈晓刚[3]，章寒冰[2]，占震滨[4]，许银亮[1]
（1.清华大学，清华大学深圳国际研究生院，清华伯克利深圳学院，北京 100084;
2. 国网浙江省电力有限公司丽水供电公司，丽水 323000;
3. 国网浙江省电力有限公司，杭州 310007;
4. 国网浙江省电力有限公司电力科学研究院，杭州 310007）

摘　要：双碳目标的提出加快了新型电力系统建设进程，随着大规模的可再生能源和分布式资源接入电力系统，如何有效利用这些多元化资源的灵活性来配合电力系统调度降低系统运行的总碳排放量成为亟须解决的关键技术难题。因此，研究了基于节点碳势的配电网分布式资源低碳调度策略，该方法能够兼顾电网运行的经济性和低碳性优化系统调度策略，从而降低系统总碳排放量。首先基于碳排放流理论对配电网进行碳势分析，然后以系统碳势为依据调整系统的购电及发电计划，并引导分布式资源优化调整自身用能方案。为保障配电网的安全稳定运行，所研究方法将电网安全运行约束考虑在内，通过仿真算例的对比分析说明了所提出策略可以提升可再生能源消纳率、降低配电网网线路损耗、减少配电网总碳排放量以及总运行成本。
关键词：双碳目标；新型电力系统；分布式资源；可再生能源；低碳调度；碳排放流理论

Low-carbon Scheduling Strategy of Distributed Energy Resources Based on Node Carbon Intensity for Distribution Networks

SONG Zehao[1], FENG Hua[2], CHEN Xiaogang[3], ZHANG Hanbing[2], ZHAN Zhenbin[4], XU Yinliang[1]
(1. Tsinghua-Berkeley Shenzhen Institute, Tsinghua Shenzhen International Graduate School, Tsinghua University, Beijing 100084, China; 2. Lishui Supply of State Grid Zhejiang Electric Power Co., Ltd., Lishui 323000, China; 3. State Grid Zhejiang Electric Power Co., Ltd., Hangzhou 310007, China; 4. Electric Power Research Institute of State Grid Zhejiang Electric Power Co., Ltd., Hangzhou 310007, China)

Abstract：The proposition of dual-carbon goal has accelerated the construction of new power systems. High penetration of renewable energy sources (RESs) and distributed energy sources (DERs) integrating into the power system pose a great challenge of how to improve the utilization of the flexibility potential provided by these various resources and to reduce the total carbon emission of the system. Consequently, we propose a low-carbon demand response (DR) strategy based on the carbon intensity for distribution networks (DNs), in which the low-carbon operation strategy can be realized by comprising both economic issue and low-carbon issue. First, we analyze the carbon intensity profile of the DN based on the carbon emission flow (CEF) theory. Then, we adjust the main grid power purchasing plan, the generation plan and guide the demand side resources to adjust their energy profile with the reference of carbon intensity. In order to ensure the safe and steady operation of the DN, the power system operation safety constraints are also included in the proposed strategy. Moreover, the numerical tests and comparison with other operation strategies have demonstrated that the proposed strategy can effectively improve the consumption of RES and reduce the branch loss, carbon emission and operation cost of DN.
Key words：dual carbon goal; new power system; distributed energy resources; renewable energy sources; low-carbon scheduling; carbon emission flow theory

0　引言

我国提出了碳达峰碳中和的双碳目标[1]来应对环境保护问题和国家能源安全战略问题，电力系统作为碳排放来源的重要主体承担着减碳减排的重要使命责任，构建新型电力系统成为推动能源结构低碳化清洁化转型的重要途径。实现双碳目标的关键途径是用低碳清洁的可再生能源(renewable energy sources, RESs)代替高污染的传统化石能源，因此近年来我国的风力发电机组(wind turbine, WT)和光伏

发电机组(photovoltaic array, PV)等可再生能源发电机组装机容量持续增长，然而由于风能、太阳能等可再生能源出力受不可控的天气因素影响较大，具有强烈的随机性和不确定性[2-3]，大规模可再生能源的接入会对电力系统运行的安全性和稳定性造成巨大冲击，传统的“源随荷动”运行模式已经不适用于含高渗透率可再生能源的新型电力系统；推行需求侧管理[4]是应对发电侧调节能力匮乏的有效途径，电力系统运营商通过动态价格信号引导，例如主动负荷(flexible loads, FLs)和储能系统(energy storage systems, ESSs)等需求侧的分布式资源(distributed energy resources, DERs)来配合电网的优化调度运行，能够充分发挥分布式资源在实现需求响应(demand response, DR)方面的调节潜力，提升系统运行的灵活性，实现“源网荷储”智慧联动电力系统的建设[5-7]。

目前已经有一些关于电力系统低碳调度策略的研究。文献[8]提出了综合能源服务商参与电力系统的低碳运行调度策略，建立电力–天然气联合优化出清模型，引入碳交易机制和综合需求响应机制为电力系统实行碳排放管理提供了有效途径。文献[9]考虑阶梯碳价和综合需求响应机制，基于碳排放权交易和博弈优化构建综合能源系统的多主体主从博弈模型，激发多方主体参与低碳经济运行的积极性。文献[10]考虑多能互补的综合能源系统碳排放量约束和需求侧响应来提升系统调度策略的经济性和低碳性。文献[11]基于能源互联网思想，通过多能互补和能量共济，建立考虑储能特性的工业园区综合能源系统来提升系统优化运行的灵活性和经济性。文献[12]针对考虑多能互补和储能异质性的园区综合能源系统的优化运行问题，基于 BP 神经网络和分支定界法构建园区综合能源系统优化运行模型，促进系统可再生能源消纳。文献[13]引入储能系统分时电价机制，计及储能系统能量损耗和功率波动研究构建多能源系统优化运行模型，提升微电网自治水平。上述文献均为探索电力系统低碳运行方式做出一定贡献，通过多类耦合互补的能源之间的转化为系统运行提供更多的灵活性。

交通系统和电力系统的协同优化运行可以提供巨大的减碳减排潜力，大规模的电动汽车群体可以为电力系统提供巨大的灵活性调节潜力，合理有效的电动汽车调度策略可以改善系统运行的经济性和低碳性。

文献[14]提出一种考虑可再生能源随机性的综合能源系统与电动汽车双层优化模型，引入源荷供需匹配度制定动态电价来引导电动汽车用户优化调整自身充放电策略。文献[15]引入碳交易市场机制，电动汽车用户可以通过出售自身用能方案优化后减少的碳排放量来获得收益，文中构建了包含发电厂与电动汽车用户利益的多目标优化目标函数，采用粒子群优化算法求解，能够发挥电动汽车群体在减少碳排放量方面的优势。

碳排放流理论[16]能够对电力供给侧和需求侧之间的传输配送环节所产生的碳排放影响进行量化分析，实现对电力系统全环节的碳排放分布的精准刻画。文献[17]针对输电网系统提出了基于碳排放流理论的低碳调度策略，引入 Shapley 碳排放责任分摊模型，考虑各个用户负荷对整个系统的碳排放边际影响，使得碳排放责任分摊方案更为公平合理。文献[18]同样基于碳排放流理论对系统的节点碳势进行量化分析，引入需求响应机制和阶梯碳价机制构建双层电力系统低碳规划模型，电力系统运营商可以根据负荷用户的用能计划调整来改变系统的发电机组及储能系统配置容量，促进电力系统低碳经济运行。

综上所述，以上文献在制定电力系统低碳调度策略的研究领域均做出了一定贡献，但仍然存在一些关键技术要点尚未被充分考虑：

1）文献[8-15]的调度策略仅仅适用于园区级别的小型电力系统，忽略了配电网等需要考虑系统网络拓扑结构、线路传输容量及节点电压运行范围等电网安全运行约束。电力系统实际应用过程中各个节点实施的调度策略会对整个电力系统的潮流及电压情况等重要运行要素产生影响，各主体在制定自身调度策略时需要将对电网运行产生的影响考虑在内，否则可能会出现线路过载及电压越限等电力事故，影响整个系统的安全稳定运行，因此在优化调度策略时将电网安全运行约束考虑在内至关重要。

2）现有的考虑系统拓扑架构的电力系统低碳调度策略文献鲜有适用于配电网调度运行的研究，文献[17-18]结合了碳排放流理论和节点碳势来制定低碳调度策略，但文中考虑的是直流潮流模型，因此文献[17-18]所提出的策略仅适用于输电网系统，然而对于线路阻抗比无法忽视的配电网系统则并不适用，因此研究适用于配电网的调度策略符合实际电力系统应用需求。

3）上述文献[8-15,17-18]均忽略了电力系统传

输功率过程中产生的有功损耗，然而优化电网运行损耗对于延长电力线路等电力设备使用寿命和减少系统运行成本具有十分重要的意义。

受上述现有研究的启发，本文提出了基于节点碳势的配电网分布式资源低碳调度策略，该策略的主要特点包括：

1）考虑电力系统网络拓扑结构、线路潮流约束及电压运行幅值约束等电网安全运行约束，有效保障电力系统的安全稳定运行。

2）将系统运行过程中的线路传输有功损耗考虑在内，有助于保护延长电力设备使用寿命及促进可再生能源就地消纳，缓解线路阻塞情况和节点电压越限等问题，减少系统运行成本。

3）基于碳排放流理论对系统碳势进行分析，以系统碳势分布状况作为低碳引导信号制定分布式资源调度策略，助力配电网系统实现更精准有效的低碳运行。

1 考虑低碳激励机制和供需两侧协同互动的低碳调度策略

本文所提出的分布式资源低碳调度策略框架如图 1 所示，配电网运营商首先结合上级电网发布的主网碳势对配电网系统碳排放分布状况进行整体感知，分别针对供给侧电源和需求侧资源制定低碳调度策略：

1）供给侧电源方面，配电网运营商综合考虑购电及发电策略的经济性和低碳性，结合主网碳势及系统直控机组的碳排放强度优化调整系统向上级电网购电策略和直控机组发电策略，并通过提高零碳排放的可再生能源机组供电比例进一步减少系统碳排放。

2）需求侧资源方面，以系统碳势分布情况作为低碳调度指引信号，并引入低碳激励机制引导需求侧分布式资源通过调整优化自身用能及充放电策略来配合系统实现低碳运行的目标，同时分布式资源可以获得低碳激励收益，实现供给侧和需求侧的协同互动。

2 配电网系统建模及碳排放流理论

2.1 二阶锥松弛配电网潮流模型

本文使用二阶锥松弛配电网潮流模型[19]对所研究的配电网进行建模，关于该模型的具体松弛过程和精确性证明可以查阅文献[20]，本节对该模型的具体阐述如下：

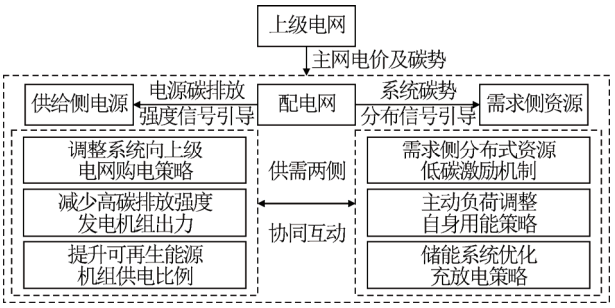


图 1 考虑低碳激励机制和供需两侧协同互动的低碳调度策略框架

Fig.1 Framework of the low-carbon scheduling strategy considering low-carbon incentive mechanism and coordination between supply and demand side

$$\sum_{ik\in\Omega_{\text{branch}}} P_{t,ik} - \sum_{ji\in\Omega_{\text{branch}}} (P_{t,ji} - r_{ji} I_{t,ji}^2) = P_{t,i} \tag{1}$$

$$\sum_{ik\in\Omega_{\text{branch}}} Q_{t,ik} - \sum_{ji\in\Omega_{\text{branch}}} (Q_{t,ji} - x_{ji} I_{t,ji}^2) = Q_{t,i} \tag{2}$$

$$U_{t,i}^2 = U_{t,j}^2 + 2(r_{ij}P_{t,ij} + x_{ij}Q_{t,ij}) - (r_{ij}^2 + x_{ij}^2) I_{t,ij}^2 \tag{3}$$

$$I_{t,ij}^2 U_{t,i}^2 = P_{t,ij}^2 + Q_{t,ij}^2 \tag{4}$$

$$P_{t,i} = P_{t,i}^{\text{WT}} + P_{t,i}^{\text{PV}} + P_{t,i}^{\text{DG}} - P_{t,i}^{\text{L}} + P_{t,i}^{\text{ESS}} \tag{5}$$

$$Q_{t,i} = Q_{t,i}^{\text{DG}} - Q_{t,i}^{\text{L}} \tag{6}$$

式中：Ω_{branch} 为配电网中所有输电线路的集合；$P_{t,i}$、$Q_{t,i}$ 分别为在 t 时刻节点 i 的净注入有功功率和无功功率；$P_{t,ik}$、$Q_{t,ik}$ 分别为在 t 时刻节点 i 下游支路 ik 流过的有功功率和无功功率；$P_{t,ji}$、$Q_{t,ji}$ 分别为在 t 时刻节点 i 上游支路 ji 流过的有功功率和无功功率；r_{ji}、x_{ji} 分别为节点 i 上游支路 ji 的线路电阻和线路电抗；$I_{t,ji}$ 为在 t 时刻节点 i 上游支路 ji 的线路电流值；$U_{t,i}$、$U_{t,j}$ 分别为在 t 时刻节点 i、j 的节点电压值；$P_{t,i}^{\text{WT}}$、$P_{t,i}^{\text{PV}}$、$P_{t,i}^{\text{DG}}$、$P_{t,i}^{\text{ESS}}$ 分别为在 t 时刻节点 i 处的风机注入有功功率、光伏注入有功功率、发电机注入有功功率及储能系统注入有功功率；$P_{t,i}^{\text{L}}$ 为在 t 时刻节点 i 处的负荷有功功率；$Q_{t,i}^{\text{DG}}$ 为在 t 时刻节点 i 处的发电机注入无功功率；$Q_{t,i}^{\text{L}}$ 为在 t 时刻节点 i 处的负荷无功功率。

通过对式(4)进行变量替换和二阶锥松弛处理可以得到：

$$\begin{cases} l_{t,ij} = I_{t,ij}^2 \\ v_{t,i} = U_{t,i}^2 \end{cases} \tag{7}$$

$$\left\| \begin{matrix} 2P_{t,ij} \\ 2Q_{t,ij} \\ l_{t,ij} - v_{t,i} \end{matrix} \right\|_2 \le l_{t,ij} + v_{t,i} \tag{8}$$

线路电流和节点电压幅值的约束为

$$\begin{cases} 0 \le I_{t,ij}^2 \le \overline{I}^2 \\ \underline{U}^2 \le U_{t,i}^2 \le \overline{U}^2 \end{cases} \tag{9}$$

式中：$l_{t,ij}$ 为在 t 时刻节点 i 上游支路 ji 的线路电流值的平方；$v_{t,i}$ 为在 t 时刻节点 i 的电压值的平方；$\overline{I}^2$ 为线路电流平方值的上限；$\underline{U}^2$、$\overline{U}^2$ 分别为节点电压平方值的下限和上限。

2.2　主网购电约束及发电机运行模型

为保障配电网的用户负荷得到保障，配电网在产生较大负荷缺额时可以通过向主网购入电功率来满足负荷需求，配电网向主网购电约束为

$$\begin{cases} \underline{P}_t^{\mathrm{MG}} \le P_t^{\mathrm{MG}} \le \overline{P}_t^{\mathrm{MG}} \\ \underline{Q}_t^{\mathrm{MG}} \le Q_t^{\mathrm{MG}} \le \overline{Q}_t^{\mathrm{MG}} \end{cases} \tag{10}$$

式中：$\underline{P}_t^{\mathrm{MG}}$、$\overline{P}_t^{\mathrm{MG}}$ 分别为配电网在 t 时刻向主网购入有功功率的下限和上限；$\underline{Q}_t^{\mathrm{MG}}$、$\overline{Q}_t^{\mathrm{MG}}$ 分别为配电网在 t 时刻向主网购入无功功率的下限和上限；P_t^{MG}、Q_t^{MG} 分别为配电网在 t 时刻向主网购入的有功功率和无功功率。

配电网还可以通过所配备的发电机组发电来满足负荷需求，对发电机组进行建模[21]如下：

$$\begin{cases} \underline{P}_{t,i}^{\mathrm{DG}} \le P_{t,i}^{\mathrm{DG}} \le \overline{P}_{t,i}^{\mathrm{DG}} \\ \underline{Q}_{t,i}^{\mathrm{DG}} \le Q_{t,i}^{\mathrm{DG}} \le \overline{Q}_{t,i}^{\mathrm{DG}} \end{cases} \tag{11}$$

$$\tan(\arccos(-\lambda_i^{\mathrm{DG}})) \le Q_{t,i}^{\mathrm{DG}} / P_{t,i}^{\mathrm{DG}} \tag{12}$$

$$Q_{t,i}^{\mathrm{DG}} / P_{t,i}^{\mathrm{DG}} \le \tan(\arccos(\lambda_i^{\mathrm{DG}})) \tag{13}$$

$$-\Delta P_{t,i}^{\mathrm{DG}} \le P_{t+1,i}^{\mathrm{DG}} - P_{t,i}^{\mathrm{DG}} \le \Delta P_{t,i}^{\mathrm{DG}} \tag{14}$$

式中：$\underline{P}_{t,i}^{\mathrm{DG}}$、$\overline{P}_{t,i}^{\mathrm{DG}}$ 分别为接入节点 i 的发电机在 t 时刻有功功率出力的下限和上限；$\underline{Q}_{t,i}^{\mathrm{DG}}$、$\overline{Q}_{t,i}^{\mathrm{DG}}$ 分别为接入节点 i 的发电机在 t 时刻无功功率出力的下限和上限；$P_{t,i}^{\mathrm{DG}}$、$Q_{t,i}^{\mathrm{DG}}$ 分别为接入节点 i 的发电机在 t 时刻的有功功率和无功功率；λ_i^{DG} 为接入节点 i 的发电机的额定功率因数；$\Delta P_{t,i}^{\mathrm{DG}}$ 为接入节点 i 的发电机在 t 时刻的爬坡功率限制。

2.3　可再生能源出力的不确定性问题建模

风机、光伏等可再生能源机组因为其本身固有的随机性问题会给电力系统的稳定运行带来安全隐患。本文采用机会约束来应对可再生能源机组出力的不确定性[22]，建立约束条件为

$$0 \le P_{i,t}^{\mathrm{RES}} \le P_{i,t,\mathrm{fore}}^{\mathrm{RES}} + \sigma_{i,t,\mathrm{fore}} \phi_a^{-1}(1-\eta) \tag{15}$$

式中：$P_{i,t}^{\mathrm{RES}}$ 为在 t 时刻节点 i 处的可再生能源机组注入有功功率；$\phi_a(\cdot)$ 为标准正态分布 $N(0,1)$ 的分布函数，该函数描述了预测误差值的分布情况；$P_{i,t,\mathrm{fore}}^{\mathrm{RES}}$、$\sigma_{i,t,\mathrm{fore}}\phi_a^{-1}(1-\eta)$ 分别为接入节点 i 的可再生能源发电机组在 t 时刻出力的预测功率期望均值和预测误差；η 为给定的置信度水平。

2.4　碳排放流理论

电力系统中产生的碳排放和系统的潮流状况密切相关，碳排放来源分析对于减少电力系统的碳排放总量至关重要，通过对碳排放流在电力系统中的分布状况及特性进行分析可以获得对影响电力系统碳排放因素的辨识，从而能够更为精准地优化系统调度策略、降低系统碳排放量。

本小节对碳排放流理论[23-24]进行阐述，如下：

1）支路潮流分布矩阵

根据系统的潮流计算结果构建支路潮流分布矩阵 $\left[P_{\mathrm{B}ij}\right]_{N^{\mathrm{Bus}}\times N^{\mathrm{Bus}}}$，其中 N^{Bus} 为电网中的节点个数，对于电网中任意一条支路 ij，规定该支路上的潮流正方向为 $i \to j$，如果该支路上的正向有功潮流为 p，支路潮流分布矩阵第 i 行第 j 列的元素为 $P_{\mathrm{B}ij}$，则 $P_{\mathrm{B}ij} = p$、$P_{\mathrm{B}ji} = 0$；反之，如果反向有功潮流为 p，则 $P_{\mathrm{B}ij} = 0$、$P_{\mathrm{B}ji} = p$；如果节点对 (m,n) 之间没有支路直接连接，则 $P_{\mathrm{B}mn} = P_{\mathrm{B}nm} = 0$；支路潮流分布矩阵的所有对角线元素均为 0。

2）发电机组注入功率分布矩阵

根据系统中各类发电机组的注入功率构建发电机组注入功率分布矩阵 $\left[P_{\mathrm{G}kj}\right]_{N^{\mathrm{DG}}\times N^{\mathrm{Bus}}}$，其中 N^{DG} 为电网中的发电机组个数，如果第 k 台发电机组接入电网节点 j，且注入的有功功率值为 p，发电机组注入功率分布矩阵第 k 行第 j 列的元素为 $P_{\mathrm{G}kj}$，则 $P_{\mathrm{G}kj} = p$，否则 $P_{\mathrm{G}kj} = 0$。

3）负荷分布矩阵

根据系统中各个节点的负荷功率构建负荷分布矩阵 $\left[P_{\mathrm{L}mj}\right]_{N^{\mathrm{Load}}\times N^{\mathrm{Bus}}}$，其中 N^{Load} 为电网中的负荷个数，如果第 m 个负荷接入电网节点 j，且负荷有功功率为 p，负荷分布矩阵第 m 行第 j 列的元素为 $P_{\mathrm{L}mj}$，则 $P_{\mathrm{L}mj} = p$，否则 $P_{\mathrm{L}mj} = 0$。

4）节点有功通量矩阵

电力系统中的碳排放流取决于节点的注入功率，与节点的流出功率无关，因此构建节点有功通量矩阵 $\left[P_{\mathrm{N}ii}\right]_{N^{\mathrm{Load}}\times N^{\mathrm{Bus}}}$，对任意节点 i 定义其上游支路的集合为 B^{Sup}，则 $P_{\mathrm{N}ii} = \sum_{s\in B^{\mathrm{Sup}}} P_{\mathrm{B}s} + P_{\mathrm{G}i}$，其中下标 s 代表节点 i 的第 s 条上游支路，且该支路的末端节

点为节点 i，对该等式解释如下，节点 i 处的注入功率 P_{Nii} 为其所有上游支路注入节点 i 功率 P_{Bs} 之和加上发电机组注入节点 i 功率 P_{Gi}，$\boldsymbol{P}_N$ 的所有非对角线元素均为 0。

5）发电机组碳排放强度

定义第 k 台发电机组的碳排放强度为 e_{Gk}，则系统发电机组碳排放强度向量为 $\boldsymbol{E}_G=[e_{G1},e_{G2},\cdots,e_{GK}]^T$。

6）节点碳势向量

定义第 i 个节点的碳势为 e_{Ni}，则系统节点碳势向量为 $\boldsymbol{E}_N=[e_{N1},e_{N2},\cdots,e_{NN}]^T$。

7）支路碳流率分布矩阵

定义 $\left[R_{Bij}\right]_{N^{Bus}\times N^{Bus}}$ 为支路碳流率分布矩阵，对于电网中任意一条支路 ij，规定该支路上的潮流正方向为 $i\to j$，支路碳流率分布矩阵第 i 行第 j 列的元素为 R_{Bij}，如果该支路上的正向碳流率为 r，则 $R_{Bij}=r$、$R_{Bji}=0$；反之，如果该支路上的反向碳流率为 r，则 $R_{Bij}=0$、$R_{Bji}=r$；如果节点对 (m,n) 之间没有支路直接连接，则 $R_{Bmn}=R_{Bnm}=0$；支路碳流率分布矩阵的所有对角线元素均为 0。

8）系统节点碳势计算方法

节点碳势定义为

$$e_{Ni}=\frac{\sum_{s\in B^{Sup}}P_{Bs}R_{Bs}+P_{Gi}e_{Gi}}{\sum_{s\in B^{Sup}}P_{Bs}+P_{Gi}} \tag{16}$$

式中 R_{Bs} 为节点 i 上游支路 s 的碳流率，节点碳势的物理意义为节点 i 的碳势由该节点 i 的上游支路注入功率所产生的碳排放流和发电机组注入该节点 i 的功率所产生的碳排放流共同决定。

将节点碳势计算式改写成矩阵形式

$$\boldsymbol{E}_N=(\boldsymbol{P}_N-\boldsymbol{P}_B^T)^{-1}\boldsymbol{P}_G^T\boldsymbol{E}_G \tag{17}$$

2.5 分布式资源建模

1）需求响应模型

在需求响应调度补偿利益的激励下，用户负荷可以在满足自身用电需求的情况下通过转移用电功率的时间维度分布来配合电网运行，构建需求响应模型[25]如下：

$$P_{t,i}^{L,DR}=P_{t,i}^{L,origin}+P_{t,i}^{L,up}-P_{t,i}^{L,down} \tag{18}$$

$$P_{t,i}^{L,up},P_{t,i}^{L,down}\in[\underline{L}_{t,i},\overline{L}_{t,i}] \tag{19}$$

$$\sum_{t=1}^{T}P_{t,i}^{L,up}=\sum_{t=1}^{T}P_{t,i}^{L,down} \tag{20}$$

$$P_{t,i}^{L,up}P_{t,i}^{L,down}=0 \tag{21}$$

$$Q_{t,i}^{L,DR}=P_{t,i}^{L,DR}\tan(\cos^{-1}(f_i)) \tag{22}$$

$$\sum_{t\in T}\left|P_{t,i}^{L,DR}-P_{t,i}^{L,pre}\right|/\sum_{t\in T}P_{t,i}^{L,pre}\le\overline{L}_i^{util} \tag{23}$$

$$\sum_{t\in T}\left(e_t^{MG}P_{t,i}^{L,pre}-E_{t,i}P_{t,i}^{L,DR}\right)/\sum_{t\in T}e_t^{MG}P_{t,i}^{L,pre}\ge\underline{L}_i^{carbon} \tag{24}$$

式中：$P_{t,i}^{L,DR}$、$Q_{t,i}^{L,DR}$ 分别为在 t 时刻第 i 个节点实施需求响应后的有功功率和无功功率；$P_{t,i}^{L,origin}$、$P_{t,i}^{L,up}$、$P_{t,i}^{L,down}$ 分别为在 t 时刻第 i 个节点的基本负荷功率、增加负荷功率及削减负荷功率；$P_{t,i}^{L,pre}$ 为在 t 时刻第 i 个节点的基本负荷功率预测值；T 为系统整个调度时段的数量；e_t^{MG} 为在 t 时刻主网的碳势；$E_{t,i}$ 为在 t 时刻第 i 个节点的碳势；$\underline{L}_{t,i}$、$\overline{L}_{t,i}$ 分别为在 t 时刻第 i 个节点的可调节负荷功率的下限和上限；f_i 为第 i 个节点的功率因数。

注意本文所考虑的需求响应模型中用户在同一时刻不能同时选择增加和削减功率，且该模型能够满足用户总用能需求在实施需求响应前后保持不变；本文还引入用户用电方式满意度[26]指标和碳减排效益指标，其中 $\overline{L}_i^{util}$ 为第 i 个负荷可以接受的用电负荷波动率的最大值；$\underline{L}_i^{carbon}$ 为第 i 个负荷的碳减排效益指标的最小值。

2）储能系统模型

储能系统具有良好的功率时间平移特性，可以在系统负荷低谷期及碳势较低的时段执行充电策略来消纳多余的可再生能源及碳排放较低的能源，在系统负荷的高峰期及碳势较高的时段执行放电策略提供功率支撑来替代碳排放较高的能源供给，构建储能系统模型[25]如下：

$$P_{t,i}^{ESS}=P_{t,i}^{ESS,ch}-P_{t,i}^{ESS,dch} \tag{25}$$

$$0\le P_{t,i}^{ESS,ch}\le u_{t,i}^{ESS}\overline{P}_{t,i}^{ESS,ch} \tag{26}$$

$$0\le P_{t,i}^{ESS,dch}\le(1-u_{t,i}^{ESS})\overline{P}_{t,i}^{ESS,dch} \tag{27}$$

$$P_{t,i}^{ESS,ch}P_{t,i}^{ESS,dch}=0 \tag{28}$$

$$S_{t,i}=S_{t-1,i}+\frac{(P_{t,i}^{ESS,ch}\eta^{ESS,ch}-P_{t,i}^{ESS,dch}/\eta^{ESS,dch})}{C_i^{ESS}}\cdot\Delta T \tag{29}$$

$$S_i^{min}\le S_{t,i}\le S_i^{max} \tag{30}$$

$$S_{init,i}=S_{T,i} \tag{31}$$

式中：$P_{t,i}^{ESS}$ 为在 t 时刻接入第 i 个节点的储能系统的接入功率；$P_{t,i}^{ESS,ch}$、$P_{t,i}^{ESS,dch}$ 分别为在 t 时刻接入第 i 个节点的储能系统的充电功率和放电功率；$\overline{P}_{t,i}^{ESS,ch}$、$\overline{P}_{t,i}^{ESS,dch}$ 分别为在 t 时刻接入第 i 个节点的储能系统的充电功率最大值和放电功率最大值；$u_{t,i}^{ESS}$ 为在 t 时刻接入第 i 个节点的储能系统充放电状态的 0-1 变量，$u_{t,i}^{ESS}=1$ 时表示在 t 时刻接入第 i 个节

点的储能系统处于充电状态，$u_{t,i}^{\mathrm{ESS}}=0$ 时表示在 t 时刻接入第 i 个节点的储能系统处于放电状态，注意储能系统在同一时刻不能同时处于充电状态和放电状态；$S_{t,i}$ 为在 t 时刻接入第 i 个节点的储能系统的荷电状态；$\eta^{\mathrm{ESS,ch}}$、$\eta^{\mathrm{ESS,dch}}$ 分别为接入第 i 个节点的储能系统的充电能量转换效率和放电能量转换效率；C_i^{ESS} 为接入第 i 个节点的储能系统的容量；ΔT 为调度时间颗粒度；$S_i^{\min}$、$S_i^{\max}$ 分别为接入第 i 个节点的储能系统运行期间荷电状态的下限和上限；$S_{\mathrm{init},i}$、$S_{\mathrm{T},i}$ 分别为接入第 i 个节点的储能系统初始时刻的荷电状态和调度周期结束时刻的荷电状态，注意本文所构建的储能系统模型为保障设备的使用寿命，储能系统在整个运行周期内保持循环充放电，即开始时刻和结束时刻的荷电状态相同。

2.6　预调度阶段目标函数

预调度阶段中根据系统基本负荷需求进行基准潮流计算，注意此处的系统基本负荷需求对应于式(18)中的 $P_{t,i}^{\mathrm{L,origin}}$，即系统各个节点在各个时刻的负荷需求，系统基本负荷可以根据负荷预测得到并作为系统制定调度策略的依据[17,26]，采用碳排放流理论基于该潮流计算结果对配电网进行整体碳势分析，为低碳调度阶段提供参考。

考虑预调度阶段的系统优化运行目标函数为

$$\begin{cases}\min F_{\mathrm{pre}}^{\mathrm{DNO}}=c(P^{\mathrm{MG}})+\sum\limits_{i\in N^{\mathrm{DG}}}c(P_i^{\mathrm{DG}})+f_{\mathrm{loss}}+f_{\mathrm{curtail}}^{\mathrm{RES}}\\ \begin{cases}c(P^{\mathrm{MG}})=\sum\limits_{t=1}^{T}\left(c_t^{\mathrm{MG}}P_t^{\mathrm{MG}}\right)\\ c(P_i^{\mathrm{DG}})=\sum\limits_{t=1}^{T}\left(a_i^{\mathrm{DG}}(P_{t,i}^{\mathrm{DG}})^2+b_i^{\mathrm{DG}}P_{t,i}^{\mathrm{DG}}\right)\\ f_{\mathrm{loss}}=c_{\mathrm{loss}}\sum\limits_{t=1}^{T}\sum\limits_{ij\in\Omega_{\mathrm{branch}}}(r_{ij}I_{t,ij}^2\Delta T)\\ f_{\mathrm{curtail}}^{\mathrm{RES}}=c_{\mathrm{curtail}}^{\mathrm{RES}}\sum\limits_{t=1}^{T}\left(\sum\limits_{i\in N^{\mathrm{Bus}}}(P_{t,i}^{\mathrm{WT,cut}}+P_{t,i}^{\mathrm{PV,cut}})\right)\end{cases}\\ \text{s.t. 式(1)—式(3)、式(5)、式(6)—式(15)}\end{cases}\tag{32}$$

式中 $F_{\mathrm{pre}}^{\mathrm{DNO}}$ 为配电网运营商在预调度阶段的目标函数，对其中包括的各项具体阐述如下：

1）主网购电成本 $c(P^{\mathrm{MG}})$，其中 c_t^{MG} 为在 t 时刻主网的售电价格。

2）发电机组发电成本，接入第 i 个节点的发电机组的发电成本为 $c(P_i^{\mathrm{DG}})$，其中 a_i^{DG}、b_i^{DG} 分别为接入第 i 个节点的发电机组的发电成本二次项系数和一次项系数。

3）网络有功损耗成本 f_{loss}，其中 c_{loss} 为网络有功损耗成本系数，$I_{t,ij}$ 为在 t 时刻支路 ij 的电流值。

4）弃风弃光成本 $f_{\mathrm{curtail}}^{\mathrm{RES}}$，其中 $c_{\mathrm{curtail}}^{\mathrm{RES}}$ 为弃风弃光成本系数，N^{RES} 为系统配备的可再生能源发电机组集合，$P_{t,i}^{\mathrm{WT,cut}}$、$P_{t,i}^{\mathrm{PV,cut}}$ 分别为在 t 时刻节点 i 的弃风弃光的有功功率值。

系统根据式(32)进行预调度阶段的潮流计算，然后根据式(17)计算得出系统节点碳势。

2.7　低碳调度阶段目标函数

基于预调度阶段得到的系统节点碳势，构建低碳调度阶段优化目标函数如下：

$$\begin{cases}\min F_{\mathrm{Final}}^{\mathrm{DNO}}=F_{\mathrm{pre}}^{\mathrm{DNO}}+\sum\limits_{i\in N^{\mathrm{Bus}}}(f_i^{\mathrm{DR}}+f_i^{\mathrm{node,c}})+\\ \sum\limits_{i\in N^{\mathrm{ESS}}}(f_i^{\mathrm{ESS}}+f_i^{\mathrm{ESS,c}})+\sum\limits_{i\in N^{\mathrm{DG}}}f_i^{\mathrm{DG,c}}+f^{\mathrm{Grid,c}}\\ \begin{cases}f_i^{\mathrm{DR}}=\sum\limits_{t\in T}c^{\mathrm{DR}}(P_{t,i}^{\mathrm{L,up}}+P_{t,i}^{\mathrm{L,down}})\Delta T\\ f_i^{\mathrm{node,c}}=\dfrac{1}{2}\sum\limits_{t\in T}\begin{pmatrix}(c^{\mathrm{CO_2}}-r^{\mathrm{CO_2}})\left|E_{t,i}-e_t^{\mathrm{MG}}\right|+\\ (c^{\mathrm{CO_2}}+r^{\mathrm{CO_2}})(E_{t,i}+e_t^{\mathrm{MG}})\end{pmatrix}P_{t,i}^{\mathrm{L,DR}}\Delta T\\ f_i^{\mathrm{ESS}}=\sum\limits_{t\in T}c^{\mathrm{ESS}}(P_{t,i}^{\mathrm{ESS,dch}}+P_{t,i}^{\mathrm{ESS,ch}})\Delta T\\ f_i^{\mathrm{ESS,c}}=\dfrac{1}{2}\sum\limits_{t\in T}\begin{pmatrix}(c^{\mathrm{CO_2}}-r^{\mathrm{CO_2}})\left|E_{t,i}-e_t^{\mathrm{MG}}\right|+\\ (c^{\mathrm{CO_2}}+r^{\mathrm{CO_2}})(E_{t,i}+e_t^{\mathrm{MG}})\end{pmatrix}P_{t,i}^{\mathrm{ESS}}\Delta T\\ f^{\mathrm{Grid,c}}=c^{\mathrm{CO_2}}\sum\limits_{t\in T}\left(e_t^{\mathrm{MG}}P_t^{\mathrm{MG}}\right)\\ f_i^{\mathrm{DG,c}}=c^{\mathrm{CO_2}}\sum\limits_{t\in T}\left(e_i^{\mathrm{DG}}P_{i,t}^{\mathrm{DG}}\right)\end{cases}\\ \text{s.t. 式(1)—式(3)、式(5)、式(6)—式(15)、式(18)—式(31)}\end{cases}\tag{33}$$

式中 $F_{\mathrm{Final}}^{\mathrm{DNO}}$ 为配电网运营商在低碳调度阶段的单优化目标函数，在预调度阶段的目标函数 $F_{\mathrm{pre}}^{\mathrm{DNO}}$ 的基础上增加负荷需求响应调度成本、储能系统运行成本及系统各类碳排放成本，对各项进行具体阐述如下：

1)配电网运营商需要支付负荷需求响应调度成本来补偿用户在调整自身用能功率过程中造成的用电不适，考虑第 i 个节点的负荷需求响应调度成本 f_i^{DR}，其中 c^{DR} 为负荷需求响应调度成本系数。

2）第 i 个节点的节点碳排放成本 $f_i^{\mathrm{node,c}}$，以主网碳势为参考基准，当在 t 时刻第 i 个节点的用户负荷所接入的节点碳势高于主网碳势时需要支付碳排放成本，当在 t 时刻第 i 个节点的用户负荷所接入的节点碳势低于主网碳势时可以获得低碳补偿激励，其中 $c^{\mathrm{CO_2}}$ 为碳排放成本系数，$r^{\mathrm{CO_2}}$ 为低碳补偿激励系数，通过鼓励用户使用低碳排放强度的能源可以提升系统可再生能源的消纳率。

3）储能系统在运行过程中会产生损耗，考虑第 i 个节点接入的储能系统运行成本 f_i^{ESS}，其中 c^{ESS} 为储能系统的运行成本系数，N^{ESS} 为系统中接入储能系统的节点集合。

4）第 i 个节点接入储能系统的碳排放成本 $f_i^{\mathrm{ESS,c}}$，同样以主网碳势为参考基准，当在 t 时刻储能系统所接入的第 i 个节点碳势高于主网碳势时储能系统充电需要支付碳排放成本，当在 t 时刻储能系统所接入的第 i 个节点碳势低于主网碳势时储能系统充电可以获得低碳补偿激励，激励储能系统对绿色低碳的可再生能源的消纳利用。

5）主网购电碳排放成本 $f^{\mathrm{Grid,c}}$。

6）第 i 个节点接入发电机组的碳排放成本 $f_i^{\mathrm{DG,c}}$，其中 e_i^{DG} 为接入第 i 个节点的发电机组的碳排放强度。

2.8 配电网分布式资源低碳调度策略实施流程

本文所提出的基于节点碳势的配电网分布式资源低碳调度策略执行流程图如图 2 所示。

1）首先输入配电网系统初始化参数及可再生能源出力预测值等系统基本参数，完成系统初始化。

2）预调度阶段依据系统基本负荷情况及可再生能源出力情况进行基准潮流分布计算。

3）结合碳排放流理论对系统全环节进行碳排放强度量化分析，得出配电网碳势分布情况。

4）低碳调度阶段配电网运营商及分布式资源主体结合系统碳势情况，兼顾低碳和经济双重目标，制定低碳调度策略。

5）计算调度策略调整前后系统碳势误差是否小于系统预设碳势误差阈值 ε，如果系统碳势误差不小于系统预设碳势误差阈值 ε，则更新系统的潮流分布状况及各主体的调度策略，继续依次迭代执行步骤 3)、4）直到系统碳势误差小于系统预设碳势误差阈值 ε，输出系统最终低碳调度策略。

需要注意的是本文所提出的配电网分布式资源低碳调度策略的出发点是各方主体根据系统实际的碳势分布情况主动调整自身的调度策略，碳势情况是调整调度策略的引导信号，因此在本文所提出的调度策略中系统碳势情况分析和低碳调度策略制定依次交替进行。

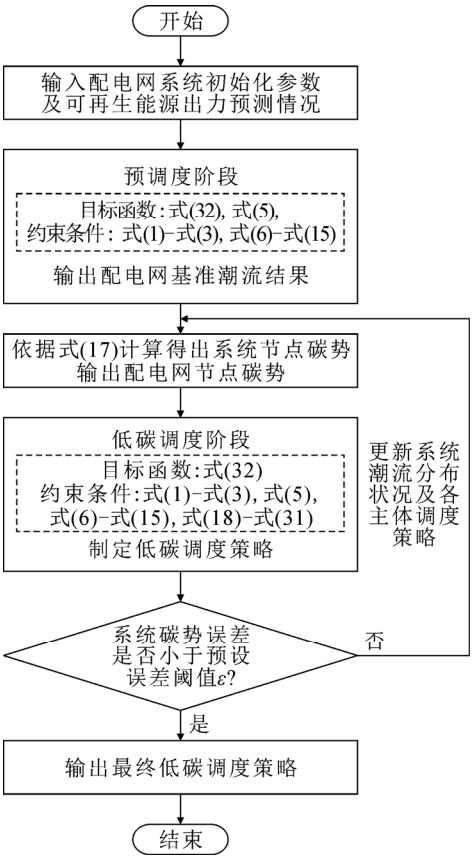


图 2 基于节点碳势的配电网分布式资源低碳调度策略实施流程图

Fig.2 Flow chart of the proposed low-carbon scheduling strategy of distributed energy resources based on node carbon intensity for distribution networks

3 算例分析

3.1 测试系统设置

为验证所提出的基于节点碳势的配电网分布式资源低碳调度策略的有效性和优越性，本文以改进的 IEEE 33 节点系统进行仿真分析，系统的拓扑结构如附录 A 图 A1 所示，其中在 13、30 节点配备装机容量分别为 1200、1000 kW 的风力发电机组；在 7、10 节点配备装机容量为 500 kW 的光伏阵列发电机组，24、27 节点配备装机容量为 400 kW 的光伏阵列发电机组；在 8、11、32 节点接入容量为 1 MWh 的储能系统，最大充放电功率为 0.2 MW，充放电能量转换效率为 0.95；系统接入的分布式发电机组具体参数参见附录 A 表 A1，设置系统最大主网购电功率为系统配备发电机装机容量和的 15%，可再生能源出力的预测误差服从均值为 0、方差为预测功率均值的 0.05 的高斯分布函数，给定置信度水平为 0.95，系统设置的碳势误差预设阈值 ε 取 0.03；系统的其他重要参数可参见附录 A 表 A2，系统线路阻抗值等网架结构参数和标准 IEEE 33 节点系统一致，系统各个节点的基准电压标幺值为

1，系统基准电压为 12.66 kV；图 A2 为系统运行周期内的负荷情况及风光出力预测值，图 A3 为主网的碳势及电价，优化调度时间颗粒度 ΔT 为 1 h，考虑调度周期为 24 h，系统各个节点在各个时刻的可调节负荷最大值为基本负荷的 20%；发电机组和系统各个节点的功率因数均为 0.85。仿真算例的实验环境为配备主频为 3.10 GHz 的 Intel i5-12500H CPU 的笔记本电脑，内存为 16 GB，使用 MatlabR2021b 软件进行仿真算例的编写，采用 Gurobi 商业求解器对所构建的模型进行求解。

3.2　对比模式设置

本文设置的对比算例设置如下：

模式 1：所提出的基于节点碳势的配电网分布式资源低碳调度策略。

模式 2：传统配电网调度策略，该方法中没有分布式资源可供配合调度。

模式 3：不考虑碳排放影响的分布式资源调度策略，即该方法中所实施的分布式资源调度策略并不考虑所产生的碳排放影响。

模式 4：不考虑网络损耗的分布式资源调度策略，该方法中不考虑调度过程中所产生的线路有功损耗。

模式 5：所提出的基于节点碳势的配电网分布式资源低碳调度策略，但不进行碳势迭代计算调整。

3.3　仿真测试结果分析

对所设置的仿真算例进行求解得到结果如下：

如附录 A 图 A4 所示，模式 1 的发电机组发电量比模式 2 减少了 67.47%，主网购电量增加了 14.75%，其原因在于模式 2 并没有考虑发电机出力及主网购电对于系统总碳排放成本的影响，选择优先使用发电成本较低的高碳排放机组进行发电，而模式 1 则综合考虑了发电机组出力的经济效益和碳排放影响进行机组调度，并且模式 1 选择在主网碳排放强度较低的时段内增加主网购电功率，在减少系统总碳排放成本的同时也可以促进主网的低碳能源消纳。

如附录 A 图 A5 所示，模式 1 的系统碳势情况相比于模式 2 有明显的降低，其原因是模式 1 所采用的基于节点碳势的配电网分布式资源低碳调度策略促进了可再生能源的就地消纳，从而将原本弃之不用的多余可再生能源代替了高碳排放的主网购电及发电机组出力，由此降低系统碳势，注意如果节点负荷完全由零碳排放的可再生能源机组供电则其节点碳势为 0。

如附录 A 图 A6 所示，模式 1 的系统节点电压波动情况与模式 2 相比较为平缓，模式 1 的系统节点电压偏移比模式 2 减少了 17.12%，结果表明所提出的方法有助于减小系统电压偏移，从而保障配电网的安全稳定运行，保障用户用电安全。

附录 A 图 A7 为模式 1 的储能系统及需求响应负荷调度策略，可以看到这些分布式资源兼顾运行的经济性和灵活性对自身的用能策略进行积极调整，模式 1 的系统总碳排放成本比模式 2 减少了 248.69%，可以证明所提出的低碳补偿激励机制能够有效引导分布式资源选择在系统节点碳势较高的时段减少用能、而在系统节点碳势较低的时段增加用能，从而降低总碳排放量，实现用电负荷在时间维度上的灵活转移，同时还可以在可再生能源出力高峰期消纳多余的新能源出力，提升可再生能源消纳率，减少系统弃风弃光量，模式 1 的弃风弃光量比模式 2 下降了 51.80%。

附录 A 图 A8 为模式 1 系统负荷在优化前后的对比情况，模式 1 的负荷调整率达到 13.05%，可以看到模式 1 所采用的方法可以实现用电负荷削峰填谷的功能，减轻配电网在负荷高峰期的供电压力，增加系统在负荷低谷期对可再生能源的消纳，通过供需两侧协同互动来提升配电网能量配置及运行效率。

结合本文所提出的基于节点碳势的配电网分布式资源低碳调度策略仿真测试结果进行进一步说明。依据碳排放流理论，电力系统中节点的碳势取决于节点注入功率的碳含量密度，其中节点注入功率包括节点上游支路注入功率及节点接入发电机组注入功率，因此节点碳势取决于节点上游支路碳流率及接入发电机组的碳排放强度。

结合附录 A 图 A5(a)对配电网系统碳势进行分析可知：配电网并网节点碳势取决于上级电网注入功率的碳含量密度，位于同一传输线路的节点往往具有相近的碳势，其原因在于受系统辐射状拓扑结构的影响，除了系统支路交互节点之外的位于支路上的普通节点呈现链条状分布，即一个普通节点只有一个上游节点和下游节点(位于支路末端的节点只有一个上游节点)；同一支路上的节点如果没有其他发电机组接入，则其节点碳势将和其上游节点保持一致，节点接入发电机组的碳排放强度会影响该节点的碳势，并影响到该节点的下游节点；高碳排放强度的发电机组向节点注入高含碳量功率会抬升

该节点及其下游节点的碳势，而注入风机、光伏可再生能源机组产生的零含碳量功率的节点及其下游节点的碳势会降低，值得一提的是在零碳排放强度可再生能源机组注入功率辐射范围内，在节点功率完全由可再生能源机组供给的时段，其供能范围内的节点碳势可以降低到0。

为验证本文所采用的二阶锥松弛潮流模型的精确性，对二阶锥松弛不等式所造成的误差进行如下计算：

$$G_{t,i}=\left|l_{t,ij}-\frac{\sqrt{P_{t,ij}^2+Q_{t,ij}^2}}{v_{t,i}}\right| \tag{34}$$

式中$G_{t,i}$为在t时刻、第i个节点采用二阶锥松弛所造成的线路电流计算误差。对系统所有节点的误差按式(34)进行计算得到的结果如附录A图A9所示，可以发现系统所有节点的误差在10^{-7}级别，证明本文所采用的二阶锥松弛配电网潮流模型的精确度可以满足配电网调度的使用需求。

如表1所示，对所设置的4个不同运行模式进行对比分析，注意表1中的总碳排放成本为系统实施所制定的调度策略后所产生的各类主体碳排放成本及减碳激励之和，模式1、3、4所采取的分布式资源调度策略均获得了一定的低碳补偿激励，前文已述及模式1与模式2的对比结果，在此对模式3和模式4的对比结果进行分析说明：

1）由模式1与模式3的对比分析可知，模式3采用的分布式资源调度策略不考虑分布式资源调度策略所产生的碳排放影响，即仅着眼于系统运行的经济成本，因而模式1的调度策略相比于模式3能获得更多的低碳补偿激励，并减少系统总碳排放量，模式1所获得的低碳补偿激励比模式3增加了73.32%，模式1兼顾系统运行的经济性和低碳性制定调度策略，提升了系统运行的综合效益。

2）由模式1与模式4的对比分析可知，模式4所采用的分布式资源调度策略忽略了调度运行过程中产生的线路损耗，即不考虑配电网的网架结构制定调度策略，因而能够完全消纳过剩的可再生能源出力，然而在实际的电力系统应用过程中，忽略系统的网络损耗和网架结构会造成严重的系统安全隐患，可以发现模式4实际所造成的线路有功损耗和电压偏移巨大，分别是模式1的线路有功损耗和电压偏移的9.20倍和39.71倍，会引起线路过载和节点电压越限等严重电力事故，影响系统安全稳定运行。因此在调度决策过程中考虑系统网架结构和线路损耗对于保障系统安全运行和降低运行成本十分重要。

如表2所示，对于是否进行碳势迭代计算调整的运行模式进行对比分析，可以发现，进行碳势迭代计算调整的模式1相比于未进行碳势迭代计算调整的模式5可以取得更好的运行策略表现，注意到模式1获得的低碳补偿激励相比于模式5增加了21.04%，并且系统节点最大碳势误差显著降低到预设碳势误差阈值范围内，其原因在于进行碳势迭代计算调整可以不断对系统的碳势分布情况和低碳调度策略进行优化调整，当系统各方主体获取到更为精准的系统碳势分布情况时可以进一步精细化调整自身的调度策略。由此可以得出，进行碳势的迭代计算调整可以显著提升对于系统碳排放分布刻画的精确度，从而获得更为精准的碳势引导信号，指引系统各方主体调整自身调度策略。

3.4 IEEE 123节点测试

为验证本文所提出策略的适用性和可拓展性，对IEEE 123节点系统进行测试，该系统的基准电压为10.5 kV，该系统在28、92、108节点配备装机容量为1200 kW的风力发电机组；在56、111、116节点配备装机容量为500 kW的光伏阵列发电机组，42、97、33节点分别配备装机容量为300、400、600 kW的光伏阵列发电机组；在30、95、112、40、88、

表1 不同运行模式对比

Table 1 Comparison of different operation case studies

IEEE 33节点系统运行参数名称	模式1	模式2	模式3	模式4
线路有功损耗/MWh	0.58	0.61	0.62	5.43
主网购电碳排放量/t	10.21	8.92	9.82	10.38
发电机组碳排放量/t	1.81	6.77	3.31	1.64
总运行成本/元	1813.34	4022.27	2029.95	2072.28
总碳排放成本/元	–568.50	382.33	–271.00	–477.55

表2 是否进行碳势迭代计算调整模式对比

Table 2 Comparison of operation case studies with/without the iteration calculation of carbon intensity

IEEE 33节点系统运行参数名称	模式1	模式5
线路有功损耗/MWh	0.58	0.59
主网购电碳排放量/t	10.21	10.63
发电机组碳排放量/t	1.81	1.46
总运行成本/元	1813.34	1909.32
总碳排放成本/元	–568.50	–469.69
最大碳势误差/(kg·kWh^{-1})	0.0273	0.6232

120 节点接入容量为 1 MWh 的储能系统，最大充放电功率为 0.2 MW，充放电能量转换效率为 0.95，系统配备的发电机组参数如附录 A 表 A3 所示，采用本文所提出的调度策略得到结果如表 3 所示。

对 IEEE 123 节点系统的测试结果证明了本文所提出策略的可拓展性和普适性，能够为配电网的低碳调度运行提供有效的解决方案。

3.5　计算效率分析

如表 4 所示，对本文所采用的 IEEE 33 节点及 IEEE 123 节点测试系统模型复杂度及计算效率进行分析。注意表 4 中的优化求解时间主要取决于所使用计算机处理器的运算能力及求解器，本文所提出策略在面对具有高复杂度的调度问题模型时具备良好的计算效率，对比 IEEE 33 节点系统和 IEEE 123 节点系统的问题建模时间可以得出，本文所提出策略在推广应用到更大规模的电力系统时具有良好的普适性，建模时间并没有随系统规模的扩大而显著增加，因而可以便捷推广应用到其他配电系统的调度策略制定过程。

4　结论

本文提出了一种基于节点碳势的配电网分布式资源低碳调度策略，基于碳排放流理论对系统碳排放分布情况进行整体感知，以节点碳势为参考信号对引导配电网制定低碳调度策略，通过算例分析后得出以下结论：

1）相比于不考虑电力系统网络安全运行约束的调度策略，本文所采用的考虑系统安全运行约束并计及网损的配电网潮流模型更适用于配电网系统的优化调度，保障系统安全稳定运行，降低系统运行网络损耗及减少系统总运行成本和总碳排放成本。

2）在低碳激励机制下，引入系统节点碳势作为低碳调度的指引信号，可以促进供给侧和需求侧的双向协调互动，并充分发挥主动负荷及储能系统等分布式资源配合系统低碳调度的灵活性优势，提升系统运行的经济性和灵活性。

3）对系统碳势和潮流分布进行交替迭代更新计算可以提升对系统碳势分布感知的精确度，从而制定更为精准有效的系统低碳调度策略。

可再生能源在电力系统中的渗透率不断增长，其本身所固有的随机性和不确定性问题将对电力系统的安全稳定运行造成巨大挑战，未来研究工作可以对系统运行过程中的不确定性问题继续深入研究探讨。同时，如何制定更为合理有效的减碳减排政策也是重点研究方向。

表 3　IEEE 123 节点测试结果

Table 3　Test results of IEEE 123 bus system

IEEE 123 节点 系统运行参数名称	模式 1	模式 2
线路有功损耗/MWh	0.49	0.81
主网购电碳排放量/t	19.73	13.67
发电机组碳排放量/t	3.20	15.60
总运行成本/元	6332.99	10 056.71
总碳排放成本/元	–879.17	603.11

表 4　IEEE 33 节点及 IEEE 123 节点测试系统模型复杂度及计算效率分析

Table 4　Analysis of computational performances over model complexity and computational time cost of IEEE 33 bus & IEEE 123 bus systems

测试系统规模	模型复杂度		计算时间/s		
	约束	变量	问题建模	优化求解	总耗费
33 节点	21 930	14 667	0.05	13.40	13.45
123 节点	75 227	54 126	0.36	158.82	159.18

附录见本刊网络版(http://hve.epri.sgcc.com.cn)。

参考文献　References

[1] 肖先勇，郑子萱. “双碳”目标下新能源为主体的新型电力系统：贡献、关键技术与挑战[J]. 工程科学与技术，2022，54(1)：47-59.
XIAO Xianyong, ZHENG Zixuan. New power systems dominated by renewable energy towards the goal of emission peak & carbon neutrality: contribution, key techniques, and challenges[J]. Advanced Engineering Sciences, 2022, 54(1): 47-59.

[2] 唐程辉，张　凡，张　宁，等. 考虑可再生能源随机性和需求响应的电力系统日前经济调度[J]. 电力系统自动化，2019，43(15)：18-25，63.
TANG Chenghui, ZHANG Fan, ZHANG Ning, et al. Day-ahead economic dispatch of power system considering renewable power uncertainty and demand response[J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(15): 18-25, 63.

[3] 徐潇源，王　晗，严　正，等. 能源转型背景下电力系统不确定性及应对方法综述[J]. 电力系统自动化，2021，45(16)：1-13.
XU Xiaoyuan, WANG Han, YAN Zheng, et al. Overview of power system uncertainty and its solutions under energy transition[J]. Automation of Electric Power Systems, 2021, 45(16): 1-13.

[4] 范　帅，危怡涵，何光宇，等. 面向新型电力系统的需求响应机制探讨[J]. 电力系统自动化，2022，46(7)：1-12.
FAN Shuai, WEI Yihan, HE Guangyu, et al. Discussion on demand response mechanism for new power systems[J]. Automation of Electric Power Systems, 2022, 46(7): 1-12.

[5] 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 Zhigang, KANG Chongqing. 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.

[6] 朱建全，刘海欣，叶汉芳，等. 园区综合能源系统优化运行研究综述[J]. 高电压技术，2022，48(7)：2469-2482.
ZHU Jianquan, LIU Haixin, YE Hanfang, et al. Review on optimal operation of park-level integrated energy system[J]. High Voltage Engineering, 2022, 48(7): 2469-2482.

[7] 魏震波，魏平桉，郭　毅，等. 考虑需求侧管理和碳交易的电–气

互联网络分散式低碳经济调度[J]. 高电压技术，2021，47(1)：33-44.
WEI Zhenbo, WEI Ping'an, GUO Yi, et al. Decentralized low-carbon economic dispatch of electricity-gas network in consideration of demand-side management and carbon trading[J]. High Voltage Engineering, 2021, 47(1): 33-44.
[8] 胡静哲，王 旭，蒋传文，等. 计及综合能源服务商参与的电力系统低碳经济调度[J]. 电网技术，2020，44(2)：514-521.
HU Jingzhe, WANG Xu, JIANG Chuanwen, et al. Low-carbon economic dispatch of power system considering participation of integrated energy service providers[J]. Power System Technology, 2020, 44(2): 514-521.
[9] 王 瑞，程 杉，汪业乔，等. 基于多主体主从博弈的区域综合能源系统低碳经济优化调度[J]. 电力系统保护与控制，2022，50(5)：12-21.
WANG Rui, CHENG Shan, WANG Yeqiao, et al. Low-carbon and economic optimization of a regional integrated energy system based on a master-slave game with multiple stakeholders[J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(5): 12-21.
[10] 丁雨昊，吕干云，刘永卫，等. 考虑碳排放目标约束和需求侧响应的综合能源系统日前优化调度[J]. 南方电网技术，2022，16(8)：1-11.
DING Yuhao, LÜ Ganyun, LIU Yongwei, et al. Day-ahead optimal scheduling of integrated energy system considering carbon emission target constraints and demand side response[J]. Southern Power System Technology, 2022, 16(8): 1-11.
[11] 张淑婷，陆 海，林小杰，等. 考虑储能的工业园区综合能源系统日前优化调度[J]. 高电压技术，2021，47(1)：93-101.
ZHANG Shuting, LU Hai, LIN Xiaojie, et al. Operation scheduling optimization of integrated-energy system in industrial park in consideration of energy storage[J]. High Voltage Engineering, 2021, 47(1): 93-101.
[12] 吴笑民，郭 雨，郑景文，等. 多能互补智慧园区能源系统优化运行方法[J]. 高电压技术，2022，48(7)：2545-2553.
WU Xiaomin, GUO Yu, ZHENG Jingwen, et al. Optimal operation method for power system of multi-energy complement smart park[J]. High Voltage Engineering, 2022, 48(7): 2545-2553.
[13] 侯 慧，刘 鹏，刘志刚，等. 电热氢多元储能系统优化调度方法[J]. 高电压技术，2022，48(2)：536-543.
HOU Hui, LIU Peng, LIU Zhigang, et al. Optimal dispatch method for multi-energy storage system of electricity heat hydrogen[J]. High Voltage Engineering, 2022, 48(2): 536-543.
[14] 张 程，匡 宇，邹复民，等. 考虑风光不确定性与电动汽车的综合能源系统低碳经济调度[J]. 电力自动化设备，2022，42(10)：236-244.
ZHANG Cheng, KUANG Yu, ZOU Fumin, et al. Low carbon economic dispatch of integrated energy system considering wind and solar uncertainty and electric vehicles[J]. Electric Power Automation Equipment, 2022, 42(10): 236-244.
[15] 陈 中，陆 舆，邢 强，等. 考虑电动汽车碳配额的电力系统调度分析[J]. 电力系统自动化，2019，43(16)：44-51.
CHEN Zhong, LU Yu, XING Qiang, et al. Dispatch analysis of power system considering carbon quota for electric vehicle[J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(16): 44-51.
[16] 周天睿，康重庆，徐乾耀，等. 电力系统碳排放流分析理论初探[J]. 电力系统自动化，2012，36(7)：38-43，85.
ZHOU Tianrui, KANG Chongqing, XU Qianyao, et al. Preliminary theoretical investigation on power system carbon emission flow[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(7): 38-43, 85.
[17] 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.
[18] 赵 伟，熊正勇，潘 艳，等. 计及碳排放流的电力系统低碳规划[J]. 电力系统自动化，2023，47(9)：23-33.
ZHAO Wei, XIONG Zhengyong, PAN Yan, et al. Low-carbon planning of power system considering carbon emission flow[J]. Automation of Electric Power Systems, 2023, 47(9): 23-33.
[19] 刘 斌，刘 锋，梅生伟，等. 基于二阶锥优化的含有载调压变压器主动配电网最优潮流[J]. 电力系统自动化，2015，39(19)：40-47.
LIU Bin, LIU Feng, MEI Shengwei, et al. Optimal power flow in active distribution networks with on-load tap changer based on second-order cone programming[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(19): 40-47.
[20] GAN L W, LI N, TOPCU U, et al. Exact convex relaxation of optimal power flow in radial networks[J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 2015, 60(1): 72-87.
[21] 仪忠凯，许银亮，吴文传. 考虑虚拟电厂多类电力产品的配电侧市场出清策略[J]. 电力系统自动化，2020，44(22)：143-151.
YI Zhongkai, XU Yinliang, WU Wenchuan. Market clearing strategy for distribution system considering multiple power commodities offered by virtual power plant[J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(22): 143-151.
[22] YI Z K, XU Y L, ZHOU J G, et al. Bi-level programming for optimal operation of an active distribution network with multiple virtual power plants[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2020, 11(4): 2855-2869.
[23] KANG C Q, ZHOU T R, CHEN Q X, et al. Carbon emission flow from generation to demand: a network-based model[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2015, 6(5): 2386-2394.
[24] 周天睿，康重庆，徐乾耀，等. 电力系统碳排放流的计算方法初探[J]. 电力系统自动化，2012，36(11)：44-49.
ZHOU Tianrui, KANG Chongqing, XU Qianyao, et al. Preliminary investigation on a method for carbon emission flow calculation of power system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(11): 44-49.
[25] YANG X D, SONG Z H, WEN J Y, et al. Network-constrained transactive control for multi-microgrids-based distribution networks with soft open points[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, doi: 10.1109/TSTE. 2023.3246360.
[26] 崔 杨，张家瑞，王 铮，等. 计及价格型需求响应的风−光−光热联合发电系统日前调度策略[J]. 中国电机工程学报，2020，40(10)：3103-3113.
CUI Yang, ZHANG Jiarui, WANG Zheng, et al. Day-ahead scheduling strategy of wind-PV-CSP hybrid power generation system by considering PDR[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(10): 3103-3113.



宋泽淏
2000—，男，硕士生
主要从事主动配电网及虚拟电厂优化运行方面的研究
E-mail: songzh22@mails.tsinghua.edu.cn

SONG Zehao



许银亮(通信作者)
1983—，男，博士，副教授
主要从事虚拟电厂、微电网和智能电网的分布式优化与控制等方面的研究
E-mail: xu.yinliang@sz.tsinghua.edu.cn

XU Yinliang
Ph.D.
Associate professor
Corresponding author

收稿日期 2023-02-21 修回日期 2023-04-24 编辑 程子丰

附录 A

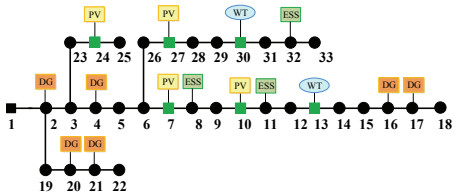


图 A1　改进的 IEEE33 节点系统

Fig.A1　Modified IEEE 33 bus system

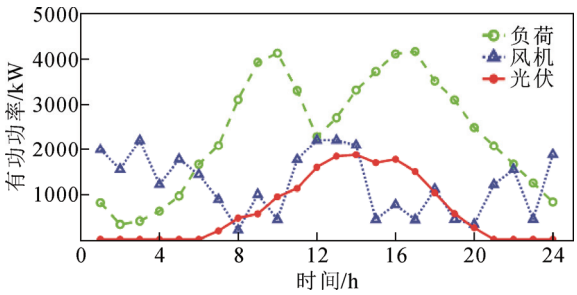


图 A2　系统运行周期内负荷情况及风光出力预测功率

Fig.A2　Load profile and RES forecast during the system operation period

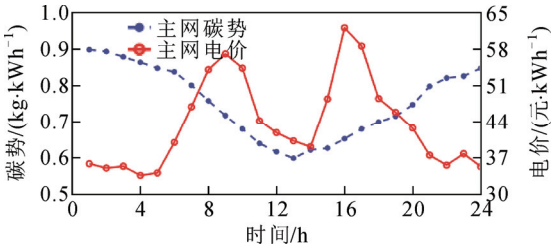
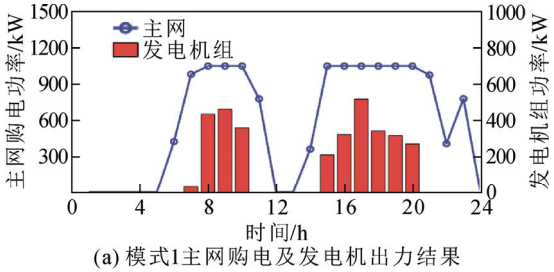
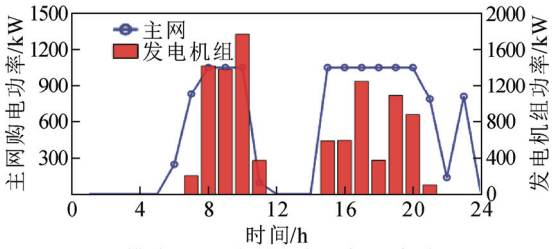


图 A3　主网碳势及电价

Fig.A3　Carbon intensity and electricity price profiles of main grid



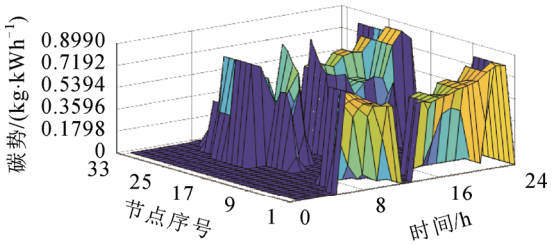
(a) 模式1主网购电及发电机出力结果



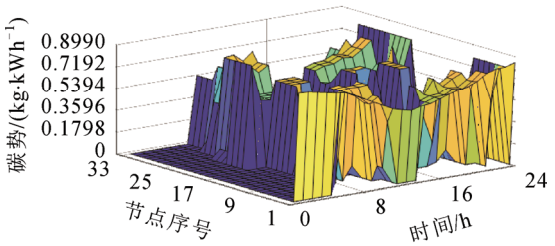
(b) 模式2主网购电及发电机出力结果

图 A4　模式 1 和模式 2 主网购电及发电机出力结果对比

Fig.A4　Comparison of main grid purchasing power and DG generation results of case 1 and case 2



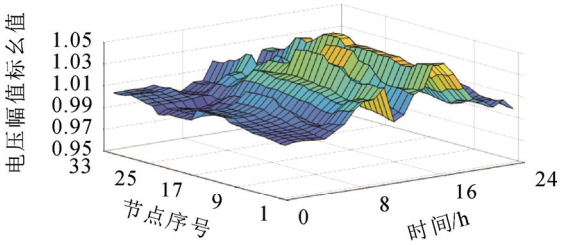
(a) 模式1系统节点碳势分布结果



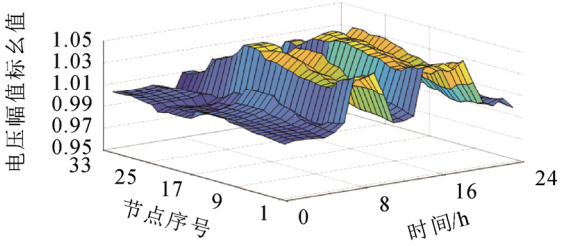
(b) 模式2系统节点碳势分布结果

图 A5　模式 1 和模式 2 系统节点碳势分布结果对比

Fig.A5　Comparison of system carbon intensity results of case 1 and case 2



(a) 模式1系统节点碳势分布结果



(b) 模式2系统节点碳势分布结果

图 A6　模式 1 和模式 2 系统电压运行结果对比

Fig.A6　Comparison of system operation voltage results of case 1 and case 2

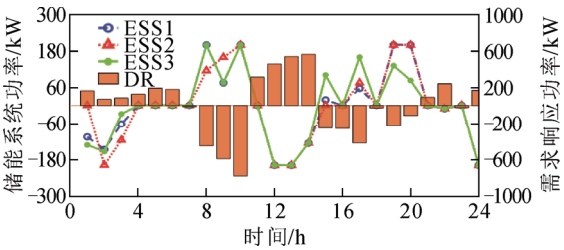


图 A7　模式 1 储能系统及需求响应调度策略

Fig.A7　Operation strategies of ESS and DR of case 1

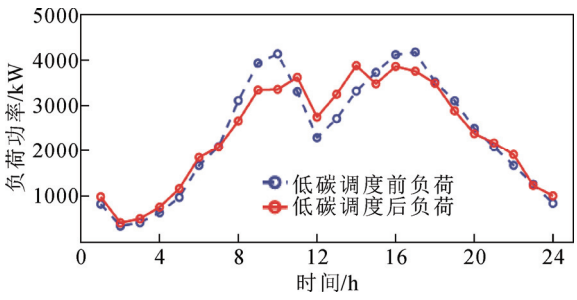


图 A8　模式 1 系统负荷低碳调度前后情况对比

Fig.A8　Comparison of origin system load profile and low-carbon scheduled load profile of case 1

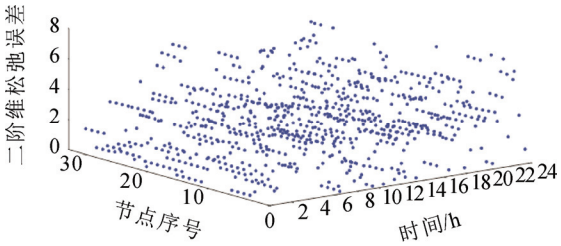


图 A9　模式 1 系统二阶锥松弛误差

Fig.A9　System second order cone relaxation error of case 1

表 A1　发电机组参数

Table A1　DG parameter

接入节点	最大有功功率/MW	最小有功功率/MW	最大无功功率/MVA	最小无功功率/MVA	二次项系数	一次项系数	碳排放强度/(kg·kWh^{-1})
2	2	0	1.6	–1.6	0.015	80	0.875
4	2	0	1.6	–1.6	0.025	85	0.875
16	1	0	0.8	–0.8	0.025	90	0.700
17	1	0	0.8	–0.8	0.020	95	0.700
20	0.5	0	0.4	–0.4	0.015	100	0.525
21	0.5	0	0.4	–0.4	0.030	105	0.525

表 A2　系统运行成本参数

Table A2　System operation cost parameter

运行成本项	参数
需求响应调度成本/(元·MWh^{-1})	34.25
储能系统运行成本/(元·MWh^{-1})	18.75
弃风弃光成本/(元·MWh^{-1})	200
线路损耗成本/(元·MWh^{-1})	80
碳排放成本/(元·t^{-1})	125
低碳补偿激励/(元·t^{-1})	75

表 A3　IEEE 123 节点系统发电机组参数

Table A3　IEEE 123 bus system DG parameter

接入节点	最大有功功率/MW	最小有功功率/MW	最大无功功率/MVA	最小无功功率/MVA	二次项系数	一次项系数	碳排放强度/(kg·kWh^{-1})
2, 8	2	0	1.6	–1.6	0.015	80	0.875
4, 12	2	0	1.6	–1.6	0.025	85	0.875
16, 32	1	0	0.8	–0.8	0.025	90	0.700
19, 35	1	0	0.8	–0.8	0.020	95	0.700
25, 43	0.5	0	0.4	–0.4	0.015	100	0.525
28, 46	0.5	0	0.4	–0.4	0.030	105	0.525