

结合 FISCO BCOS 与拓扑优化一致性算法的配电网多目标经济调度

王桂兰^{1,2}, 张成^{1,2*}, 周国亮³

(1. 华北电力大学控制与计算机工程学院, 河北 保定 071000;

2. 华北电力大学复杂能源系统智能计算教育部工程研究中心, 河北 保定 071000;

3. 国网冀北电力有限公司技能培训中心, 河北 保定 071051)

摘要: 随着分布式能源的高比例渗透、大量储能单元以及柔性负荷的加入, 主动配电网的优化调度变得更加具有挑战性。现有经济调度较少考虑柔性负荷和储能单元的接入, 收敛速度较慢。结合国家“双碳”目标, 提出 FISCO BCOS 平台下结合通信拓扑优化一致性算法的配电网多目标经济调度策略。该策略综合考虑发电机发电成本、污染气体排放、储能成本和柔性负荷用电效益, 利用通信拓扑优化的一致性算法提高系统收敛速度, 结合 FISCO BCOS 联盟链的存储和精简实用拜占庭容错 (rPBFT) 共识机制优化节点间的信息共享, 降低领导节点的中心性, 防止部分节点作恶, 实现配电网多目标最优功率分配。仿真结果表明, 提出的配电网多目标调度经济调度策略收敛速度快, 在领导节点切换、不同阶段节点退出与加入及功率交换指令变化、收敛系数变动场景下仍能较快收敛, 具有良好的鲁棒性和稳定性, 且收敛速度优于快速一致性算法, 若目标权重系数选取恰当, 经济与环境结果均优于多目标 NSGA-II 算法。

关键词: 主动配电网; 区块链; FISCO BCOS 平台; 多目标调度; 通信拓扑优化; 一致性算法

中图分类号: TP391

文献标志码: A

DOI: 10.19678/j.issn.1000-3428.0069274

Multi-objective Economic Scheduling of Distribution Networks with FISCO BCOS and Topology Optimization Consistency Algorithm

WANG Guilan^{1,2}, ZHANG Cheng^{1,2*}, ZHOU Guoliang³

(1. School of Control and Computer Engineering, North China Electric Power University, Baoding 071000, Hebei, China;

2. Engineering Research Center of Intelligent Computing for Complex Energy Systems,

Ministry of Education, North China Electric Power University, Baoding 071000, Hebei, China;

3. Skill Training Center of State Grid Jibei Electric Power Co., Ltd., Baoding 071051, Hebei, China)

【Abstract】 The high penetration of distributed energy, addition of many energy storage units, and flexible loads have hindered the optimization and scheduling of active distribution networks. Existing economic dispatch systems do not consider the integration of flexible loads and energy storage units effectively, resulting in slow convergence speed. Aligning with the national “dual carbon” goals, this paper proposes a multi-objective economic dispatch strategy for distribution networks based on the FISCO BCOS platform, combined with the consistency algorithm in communication topology optimization. This strategy comprehensively considers power generation cost, gas emissions, energy storage cost, and the benefits of flexible load electricity consumption. It uses the consistency algorithm in communication topology optimization to improve the system's convergence speed. Moreover, it combines the storage of the FISCO BCOS alliance chain and the reduced Practical Byzantine Fault Tolerance (rPBFT) consensus mechanism to optimize information sharing between nodes, reduce the centrality of leading nodes, prevent malicious nodes from attacking, and achieve multi-objective optimal power allocation in the distribution network. Simulation results show that the proposed multi-objective scheduling economic dispatch strategy converges quickly despite leader node switching, node exit and addition at different stages, power exchange instruction changes, and convergence coefficient changes. It is robust, stable, and achieves a higher convergence speed than that of the fast-consistency algorithm. It selects appropriate target weight coefficients, yielding economic and environmental outcomes that are better than those provided by the multi-objective NSGA-II algorithm.

【Key words】 active distribution network; blockchain; FISCO BCOS platform; multi-objective scheduling; communication topology optimization; consistency algorithms

收稿日期: 2024-01-21 修回日期: 2024-03-25

基金项目: 河北省教育厅科学研究项目 (ZD2021414)。

通信作者 E-mail: * 3480216185@qq.com

0 引言

随着分布式能源和柔性负荷加入到配电网中,主动配电网的优化调度变得更加复杂。为了应对这一挑战,主动配电网一般采用高可靠性的保护设备、灵活的拓扑结构及完善的智能监测系统等,加强对分布式能源和柔性负荷的控制和管理^[1]。经济调度是指在电力系统中,通过合理地安排发电机、负荷以及储能设备的运行方式和功率调节,满足电力系统的运行需求和各项约束条件的过程。经济调度的目标是在确保电力系统稳定运行的基础上最大程度地降低发电成本,提高能源利用率,优化整个电力系统的运行效率。

主动配电网的优化控制方式一般分为集中式和分布式两种。集中式优化控制方式^[2]是指通过中央控制器或集中式管理系统对主动配电网进行整体优化和调度。在这种方式下,所有的分布式能源资源和负荷设备通过通信网络与中央控制器连接,中央控制器收集和分析系统各部分数据,制定全局优化策略。这种方式普遍存在可靠性差、控制中心通信和计算压力大的问题,不适用于包含大量分布式电源的场景。分布式优化控制方式^[3]是指在主动配电网中,各个分布式能源资源和负荷设备具备一定的智能和优化决策能力,通过本地控制和相互协同实现系统的优化。相邻多智能体互相交换信息,自主更新自身状态,可靠性强,计算压力均匀,能较好地适应分布式电源的分散特性。

现有的经济调度策略大多仅考虑发电成本最小的单目标优化^[4],没有考虑接入柔性负荷和储能单元后对于整个配电网经济调度的影响。文献[5]提出一种基于主从博弈理论的电热能源系统优化调度方法,解决电热能源系统经济性欠优的问题,但未考虑储能单元。文献[6]提出一种基于领导-跟随多智能体的改进有限时间一致性算法,该算法能够满足微电网拓扑结构变化等要求,加快系统收敛速度,但未考虑环境成本。随着我国 2030 年前实现碳达峰,2060 年前实现碳中和“双碳”目标的提出,配电网低碳经济调度成为亟待解决的问题^[7]。文献[8]提出未来态配电网碳电耦合新型调度模型,基于二阶锥规划模型提出配电网优化调度策略,能够有效地应用在“双碳”目标下的配电网经济调度中,提高配电网的稳定性,促进清洁能源消纳。

在分布式经济调度中,一致性算法性能的优劣主要取决于算法的收敛速度,并影响系统的稳定性。文献[9]提出了一种基于优化一致性算法的微网功率经

济分配策略,将改进的一致性算法与下垂控制信息相结合,能够有效地克服被控单元之间的通信滞后,提高系统收敛性能。文献[10]通过仿真分析了领导节点选取、通信网络结构、反馈系数因素对离散系统收敛速度的影响。文献[11]提出一种基于一致性原理和梯度下降法的完全分布式优化调度策略,将一致性原理与梯度下降法相结合,提高系统的收敛速度。

区块链是一种去中心化的分布式账本技术,它以块的形式将交易记录按时间顺序连接起来,形成不可篡改的链式结构。该技术具有分布式存储、不可篡改、安全可信和可编程等特性,有助于建立电力系统的保护框架^[12],并在无中心机构的情况下确保数据的不可篡改和公开透明^[13]。FISCO BCOS 是国产开源、安全可控的金融联盟链平台,以联盟链需求为导向,兼顾性能、安全、运维、易用及扩展性,提供可视化中间件,简化建链、开发、部署流程,支持分布式存储与计算分离,具有预编译框架系统较高的交易吞吐量及鲁棒性。

本文在 FISCO BCOS 平台下构建了考虑柔性负荷、低碳的多目标经济调度方案,其通信拓扑优化的一致性算法收敛速度快,以使系统具有较高的稳定性和鲁棒性。

1 FISCO BCOS 平台技术

1.1 区块链

区块链是以比特币为代表的数字加密货币体系的核心支撑技术^[14],是一种去中心化的、数据不可篡改的、安全性高的分布式网络,其核心技术主要包括分布式存储、共识机制、智能合约以及非对称加密算法等^[15-16]。区块链使用分布式存储来保存交易记录,数据被分布在网络上的多个节点,而不是集中存储在单一的中心服务器上。共识机制是区块链网络中确保数据一致性和完整性的规则。智能合约是区块链上自动执行的合同,可用于自动化交易、数字资产管理、投票和其他应用^[17]。区块链使用非对称加密算法来保护数据的隐私和安全。

1.2 FISCO BCOS 平台的 rPBFT 算法

FISCO BCOS 平台的精简实用拜占庭容错(rPBFT)共识算法是对传统实用拜占庭容错(PBFT)算法的改良,它的目标是在保留 PBFT 共识算法高性能、高吞吐量、高一致性、安全性的同时,将共识算法网络复杂度与共识节点规模解耦,提升区块链系统的可扩展性^[18]。

rPBFT 要求节点集合中的 $1/2$ 节点是诚实的,降低了共识的门槛,但仍然能够抵御拜占庭故障。

同时, rPBFT 采用了更高效的共识过程, 减少了消息传递和验证的复杂性, 降低了网络通信负担, 提高了系统的性能, 增强了系统的可扩展性。

rPBFT 共识算法的节点分为两类, 分别为共识委员节点和验证节点。共识委员节点执行共识流程, 验证节点则验证共识节点及区块是否合法, 经过若干轮共识后切换为共识节点。同时, 在共识过程中, rPBFT 算法的每轮共识流程选定若干个共识委员, 并周期性地替换共识委员, 保障系统安全性。

rPBFT 算法与 PBFT 的共识流程^[19]相似, 算法流程分为 5 个阶段, 即请求、预准备、准备、确认和响应。具体流程如图 1 所示。

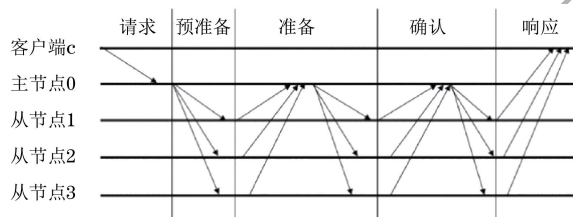


图 1 rPBFT 算法共识流程

Fig. 1 Consensus procedure of rPBFT algorithm

2 通信拓扑优化的一致性算法

一致性算法的主要思想是: 为保证分布式系统中多个节点之间达成一致, 各个节点与相邻节点之间交换信息, 并依据相邻节点信息更新本节点的数据^[20]; 经过多次迭代后, 各节点相关数据收敛到相同值。

2.1 通信拓扑结构模型

将配电网中各分布式电源视为独立的智能体, 各分布式电源间通信网络拓扑结构为 $G=(V, E)$, 其中, V 为无向节点集, 代表配电网中各分布式电源, E 为图 G 的边集, 表示各个分布式电源之间的通信线路。若 V 中的任意两个节点 i, j 之间是连通的, 则记为边 $(i, j) \in E$ 。

设图 G 是无向连通图, 则图中任意两个节点之间均存在通路。图 G 的邻接矩阵 $A=(a_{ij})$ 定义^[21]如式(1)所示:

$$a_{ij} = \begin{cases} \frac{1}{\max(n_i, n_j) + 1}, & j \in N_i \\ 1 - \sum_{j \in N_i} \frac{1}{\max(n_i, n_j) + 1}, & i = j \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (1)$$

式中: n_i 和 n_j 是节点 i 和节点 j 的邻节点数。

设无向连通图 G 为等邻居节点图, 则其邻接矩阵 A 为双随机矩阵。

令 $x_i(k)$ 和 $u_i(k)$ 分别代表配电网中第 i 个分布式电源智能体的状态和输入, 如式(2)、式(3)所示:

$$x_i(k+1) = x_i(k) + u_i(k) \quad (2)$$

$$u_i(k) = \sum_{j \in N_i} a_{ji} [x_j(k) - x_i(k)] \quad (3)$$

将式(3)代入式(2), 得到式(4):

$$x_i(k+1) = x_i(k) + \sum_{j \in N_i} a_{ji} [x_j(k) - x_i(k)], \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (4)$$

式(4)可以写成矩阵形式, 如式(5)所示:

$$\mathbf{x}(k+1) = \mathbf{A}\mathbf{x}(k) \quad (5)$$

式中: $\mathbf{x} = [x_1, x_2, \dots, x_n]^T$; $\mathbf{A} \in \mathbb{R}^{n \times n}$ 为图 G 的邻接矩阵。

2.2 通信拓扑优化的一致性算法

本文配电网分布式电源通信拓扑优化主要基于对邻接矩阵式(5)的改进来完成, 忽略反馈系数 ϵ 等的影响, 则邻接矩阵模型如式(6)所示:

$$\lambda(k+1) = \mathbf{A}\lambda(k) \quad (6)$$

一致性算法的收敛速度与邻接矩阵 $\mathbf{A}$ 的特征值紧密相关^[21], 最大特征值为 1 可保证系统收敛后的微增率一致, 即经济性最优; 绝对值第 2 大的特征值影响系统的收敛速度, 其值越小, 系统收敛速度越快。因此, 本文以 $\mathbf{A}$ 绝对值第 2 大特征值最小为通信拓扑优化目标, 以提高系统的收敛速度, 增强系统稳定性。

n 阶邻接矩阵 $\mathbf{A}$ 的各特征值可以表示为 $-1 < \lambda_1 < \lambda_2 < \dots < \lambda_n = 1$, 其中, $\mathbf{A}$ 为实对称矩阵, 存在正交矩阵 $\mathbf{P}$, 使 $\mathbf{P}^T \mathbf{A} \mathbf{P}$ 为对角矩阵, 如式(7)所示:

$$\mathbf{P}^T \mathbf{A} \mathbf{P} = \begin{bmatrix} 1 & & & \\ & \lambda_{n-1} & & \\ & & \ddots & \\ & & & \lambda_1 \end{bmatrix} \quad (7)$$

矩阵 $\mathbf{P}$ 特征值为 1, 对应的特征向量为 $\left[\frac{1}{\sqrt{n}} \frac{1}{\sqrt{n}} \dots \frac{1}{\sqrt{n}} \right]^T$, $\mathbf{P}$ 的各行和各列都是单位向量, 且两两正交。

构造矩阵 $\mathbf{C} = \mathbf{A} - \left(\frac{1}{n} \right) \mathbf{1}_{n \times 1} \mathbf{1}_{n \times 1}^T = (a'_{ij})$, 其中, $\mathbf{1}_{n \times 1}$ 为元素均为 1 的列向量, 则 $\mathbf{C}$ 可以表示为:

$$\mathbf{P}^T \mathbf{C} \mathbf{P} = \mathbf{P}^T \mathbf{A} \mathbf{P} - \frac{1}{n} \mathbf{P}^T \begin{bmatrix} 1 & 1 & \dots & 1 \\ 1 & 1 & \dots & 1 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 1 & 1 & \dots & 1 \end{bmatrix} \mathbf{P} = \begin{bmatrix} 0 & & & \\ & \lambda_{n-1} & & \\ & & \ddots & \\ & & & \lambda_1 \end{bmatrix} \quad (8)$$

由式(8)可知,矩阵 C 的谱半径对应矩阵 A 的绝对值第 2 大的特征值。因此,优化矩阵 A 绝对值第 2 大特征值就变为对矩阵 C 的谱半径的优化,得到如式(9)所示的优化问题:

$$\begin{aligned} \min \rho(C) &= \min \rho \left[A - \left(\frac{1}{n} \right) \mathbf{1}_{n \times 1} \mathbf{1}_{n \times 1}^T \right] \\ \text{s. t. } A \mathbf{1}_{n \times 1} &= \mathbf{1}_{n \times 1}, A = A^T \end{aligned} \quad (9)$$

引入标量 q , 将上述问题转化为标准特征值的优化问题:

$$\begin{aligned} \min q \\ \text{s. t. } -qI &\leq A - \left(\frac{1}{n} \right) \mathbf{1}_{n \times 1} \mathbf{1}_{n \times 1}^T \leq qI \\ A \mathbf{1}_{n \times 1} &= \mathbf{1}_{n \times 1}, A = A^T \end{aligned} \quad (10)$$

从式(10)可见,优化问题更易求解,仅需求解 A 的最优权重参数,即可得到最大特征值为 1、绝对值第 2 大的特征值最小的最优邻接矩阵,一致性算法获得最快收敛速度。

3 配电网多目标经济调度策略

3.1 配电网多目标经济调度模型

本文的主动配电网由发电机组(G)、储能单元(B)、柔性负荷(D)以及可再生能源组(REG)组成,其结构如图 2 所示。在区块链系统中,每个节点部署一个区块链智能体,各个节点参与共识,获取相邻节点的状态信息,更新本节点信息,使所有节点的一致性参数收敛到相等的值,实现配电网的优化调度及整个配电网运行成本最小化。

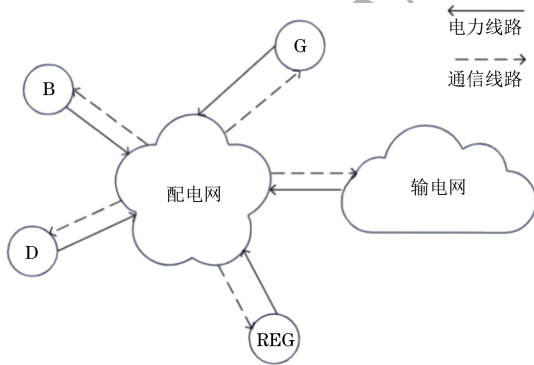


图 2 主动配电网系统结构

Fig.2 Structure of active distribution network system

3.1.1 经济调度模型

本文经济调度因素不仅包括发电机组发电成本^[22],还包括储能蓄电池成本和柔性负荷的用电效益,计算公式如下:

$$F_G(P_{Gi}) = \alpha_i + \beta_i P_{Gi} + \gamma_i P_{Gi}^2 \quad (11)$$

$$F_B(P_{Bi}) = \varphi P_{Bi}^2 \quad (12)$$

$$F_D(P_{Di}) = a_i + b_i P_{Di} + c_i P_{Di}^2 \quad (13)$$

式中: α_i 、 β_i 、 γ_i 分别为第 i 号发电机燃料成本的常数项、一次项和二次项相关系数; φ 表示储能蓄电池的参数; a_i 、 b_i 、 c_i 分别为第 i 号柔性负荷的常数项、一次项和二次项相关系数。

经济调度的目标函数计算公式如式(14)所示:

$$\min \sum F_G(P_{Gi}) + \sum F_B(P_{Bi}) - \sum F_D(P_{Di}) \quad (14)$$

3.1.2 环境调度模型

本文实现低碳目标的环境因素模型如式(15)所示:

$$F_E(P_{Gi}) = d_i + e_i P_{Gi} + f_i P_{Gi}^2 \quad (15)$$

式中: d_i 、 e_i 、 f_i 分别为第 i 号发电机排放函数的常数项、一次项和二次项相关系数。

3.1.3 综合经济和环境的多目标模型

多目标优化问题是指利用最优解集来代替最优解,最优解集中所有的目标函数均优于其他解。多目标转为单目标算法主要有 ϵ -约束法、层次分析法与线性加权法。 ϵ -约束法通过选择恰当的函数,调整 ϵ 值来保证其值处于目标函数的最小值与最大值之内(不一定为最优解),对函数选择及 ϵ 值选取的恰当性要求较高。层次分析法是用于解决复杂决策问题的定性、定量分析方法,需要对不同目标进行定量划分,确定各指标的重要程度。当指标数量增加时,各指标重要程度的划分变得困难,并增加计算复杂度。线性加权法易于理解,便于计算,通过选择恰当的权重系数便可获得较好的效果;尤其是产生帕累托集合的加权求和方法在近几十年的凸集问题中表现良好。

基于以上分析,本文采用线性加权法为经济和环境两个目标函数分配恰当的权值,将多目标问题转化为单目标问题。综合经济与环境影响的多目标模型如式(16)所示:

$$\begin{aligned} \min F = \min w_1 & \left(\sum F_G(P_{Gi}) + \sum F_B(P_{Bi}) - \sum F_D(P_{Di}) \right) \\ & + w_2 \left(\sum F_E(P_{Gi}) \right) \end{aligned} \quad (16)$$

式中: $w_1 + w_2 = 1$, $0 < w_1, w_2 < 1$ 。

3.2 约束条件

1) 等式约束条件。

配电网优化调度的等式约束^[23]如式(17)所示:

$$\sum P_{Di} + \sum P_{Bi} + P_{REG} = \sum P_{Gi} + P_{ex} \quad (17)$$

式中: $\sum P_{Di}$ 为所有柔性负荷功率总和; $\sum P_{Bi}$ 、 P_{REG} 分别为储能蓄电池功率总和、可再生能源机组功率; $\sum P_{Gi}$ 为所有发电机输出功率总和; P_{ex} 为输电网与配电网间的功率交换指令。

2) 不等式约束条件。

配电网各节点单元的不等式约束如式(18)所示:

$$P_i^{\min} \leq P_i \leq P_i^{\max} \quad (18)$$

式中: $P_i^{\min}$ 和 $P_i^{\max}$ 分别为对应节点功率的最小值和最大值。

系统旋转备用约束^[24]如式(19)所示:

$$\sum P_{i, \text{pow}}^{\max} - \sum P_{i, \text{pow}} \geq R(t) \quad (19)$$

式中: $P_{i, \text{pow}}^{\max}$ 为第 i 个电源的功率上限; $P_{i, \text{pow}}$ 为第 i 个电源的当前功率; $R(t)$ 为系统当前时刻的旋转备用容量。

3.3 基于通信拓扑优化一致性算法的调度方法

在式(17)条件下,通过拉格朗日乘子法将原目标函数式(16)转化为式(20):

$$\begin{aligned} \min F = & \omega_1 \left(\sum F_G(P_{G_i}) + \sum F_B(P_{B_i}) - \right. \\ & \left. \sum F_D(P_{D_i}) \right) + \omega_2 \left(\sum F_E(P_{G_i}) + \right. \\ & \left. \lambda \left(\sum P_{D_i} + \sum P_{B_i} + P_{\text{REG}} - \sum P_{G_i} + P_{\text{ex}} \right) \right) \end{aligned} \quad (20)$$

对式(20)求偏导,得到配电网协调优化调度问题的最优条件,如式(21)所示:

$$\begin{cases} \lambda_{G_i} = \omega_1(\beta_i + 2\gamma_i P_{G_i}) + \omega_2(e_i + 2f_i P_{G_i}) \\ \lambda_{D_i} = \omega_1(b_i + 2c_i P_{D_i}) \\ \lambda_{B_i} = -2\omega_1 \varphi P_{B_i} \end{cases} \quad (21)$$

式中: λ_{G_i} 、 λ_{B_i} 分别是发电机组、储能单元的微增成本; λ_{D_i} 为柔性负荷的用电效益。以上述参数为一致性变量,实现配电网优化调度。

由式(21)可知,经过多次迭代后,各个节点一致性变量相等,如式(22)所示:

$$\lambda_{G_i} = \lambda_{D_i} = \lambda_{B_i} \quad (22)$$

在配电网运行过程中,各个分布式电源节点与相邻分布式电源节点交换信息,不断更新本节点的数据,在多次迭代后,使各节点一致性变量达到一致。随机选取某节点为领导节点,其余节点则为从节点,主从节点根据优化后邻接矩阵 $\mathbf{A}$ 中的参数更新节点中的一致性变量。

领导节点和柔性负荷的一致性变量更新如式(23)所示:

$$\lambda_i(k+1) = \sum_{j=1}^n a'_{ij} \lambda_j(k) + \epsilon \Delta P \quad (23)$$

式中: $\lambda_i(k+1)$ 和 $\lambda_j(k)$ 分别为第 i 号电源节点第 $k+1$ 轮和第 j 号电源第 k 轮的一致性变量; ϵ 为收敛系数; ΔP 为系统功率差额。 ΔP 的计算方法如

式(24)所示:

$$\Delta P = \sum P_{D_i} + \sum P_{B_i} + P_{\text{REG}} - \left(\sum P_{G_i} + P_{\text{ex}} \right) \quad (24)$$

从节点的一致性变量更新公式如式(25)所示:

$$\lambda_i(k+1) = \sum_{j=1}^n a'_{ij} \lambda_j(k) \quad (25)$$

当配电网中所有节点的一致性变量收敛到相等值后,系统状态达到低碳经济最优调度目标。

4 FISCO BCOS 平台下配电网多目标经济调度策略

4.1 FISCO BCOS 平台下配电网多目标经济调度框架

本文在 FISCO BCOS 平台上的配电网多目标经济调度框架如图 3 所示,从下往上主要包括数据层、网络层、共识层、合约层和应用层。

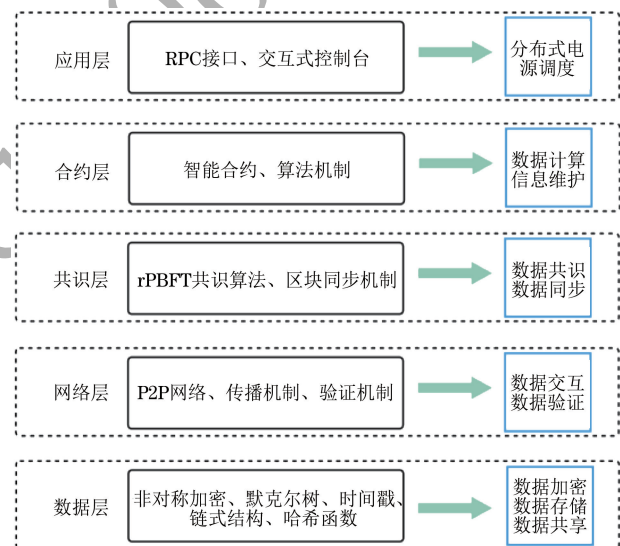


图 3 FISCO BCOS 平台下配电网多目标经济调度框架

Fig. 3 Framework of multi-objective economic dispatch for distribution network under FISCO BCOS platform

1) 数据层基于非对称加密、默克尔树、时间戳、哈希函数等关键技术,将分布式电源参数及调度数据等信息加密并进行去中心化分布式存储以及校验区块数据的合法性,确保数据的完整性、安全性和可追溯;

2) 网络层通过数据传输机制和验证机制将区块链底层的 P2P 网络组织起来,各分布式电源节点基于 P2P 网络通信,传递相关信息;

3) 共识层通过网络中的 rPBFT 共识算法和区块同步机制能够让各分布式电源节点对调度数据等信息达成共识和同步,实现数据共享并确保全网记账一致性;

4) 合约层将配电网多目标调度策略以智能合约的形式写入, 保证调度计算的智能性;

5) 应用层根据提供的多种调用接口和交互式控制台, 实现分布式电源调度的多种场景, 检测模型的实际效果。

4.2 FISCO BCOS 平台下配电网多目标经济调度流程

FISCO BCOS 平台结合通信拓扑优化一致性算法的配电网多目标经济调度流程如图 4 所示。

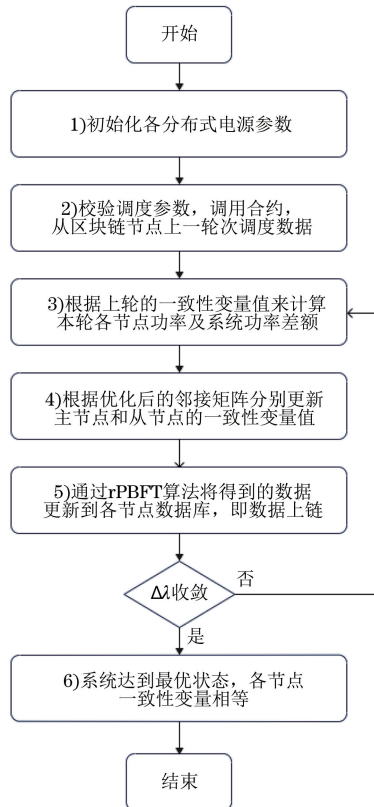


图 4 FISCO BCOS 平台结合通信拓扑优化一致性算法的配电网多目标经济调度流程

Fig.4 Multi-objective economic dispatch process for distribution networks using FISCO BCOS platform combined with communication topology optimization consistency algorithm

配电网多目标经济调度流程如下:

1) 初始化系统参数, 包括各个分布式电源的相关系数、各节点功率上下限 $P_i^{\min}$ 、 $P_i^{\max}$ 以及一致性变量初始值 $\lambda_i^{(0)}$ 等, 将初始化系统参数写入初始区块。

2) 校验上一轮次传入的参数(第 1 轮为初始化系统参数)是否合法, 如果合法则调用区块链智能合约获取各节点上一轮次的功率 $P_i^{(k-1)}$ 以及一致性变量值 $\lambda_i^{(k-1)}$ 。

3) 根据上一轮一致性变量值 $\lambda_i^{(k-1)}$ 计算当前轮

次各节点功率 $P_i^{(k)}$ 以及系统率差额 ΔP 。

4) 根据优化后的邻接矩阵按照式(23)和式(25)分别更新领导节点和从节点的一致性变量 $\lambda_i^{(k)}$ 。

5) 将本轮中各节点数据通过 rPBFT 共识算法更新到各节点数据库, 即数据上链。

6) 重复步骤 2)~步骤 5), 直到各节点的一致性变量相等, 即一致性变量收敛到某一个值。

4.3 FISCO BCOS 平台智能合约与 rPBFT 共识算法

将结合通信拓扑优化一致性算法的配电网多目标经济调度策略编写为智能合约, 并部署在 FISCO BCOS 平台联盟链上。智能合约以原子性运行在沙盒环境下无法被干扰和修改, 自动完成调度过程, 可以有效避免传统模式中人工参与调度的影响。

FISCO BCOS 平台联盟链存储机制和 rPBFT 共识算法可以降低领导节点的中心性, 避免领导节点作恶:

1) 各分布式电源参数存储在区块链节点中, 在每轮调度过程中, 数据通过 rPBFT 共识算法同步到各节点的本地数据库中, 保证数据一致性。各节点直接从本地数据库获取全局信息, 减少了系统通信压力。

2) 在 rPBFT 算法共识过程中, 由所有的共识委员共同验证功率差额, 摒弃领导节点, 降低系统对于领导节点的依赖性和领导节点的中心性, 实现完全分布式调度。

3) 在 FISCO BCOS 平台联盟链中, 为保障系统正常运行、确认领导节点可用、防止领导节点故意作恶, 区块链系统在没有产生交易时会产生空块, 但不落盘空块, 可消除空块落盘存储开销, 并防止领导节点作恶。

4) 共识委员从节点中随机选取, 节点数目固定, 与节点规模无关, 使得 rPBFT 共识算法可扩展性强。同时, rPBFT 共识算法周期性地替换部分共识委员节点为验证节点, 提高系统安全性, 防止共识委员节点联合作恶。

5 仿真算例分析

为了验证结合区块链和拓扑优化一致性算法的配电网多目标调度策略, 本文使用 VMWare 虚拟机构建 FISCO BCOS 联盟链网络, 在联盟链网络中模拟配电网中的 6 个分布式电源节点。发电机、柔性负荷和储能单元的参数如表 1 所示, 发电机的环境调度参数如表 2 所示。

表 1 发电机、柔性负荷和储能单元参数

Table 1 Generator, flexible load, and energy storage unit parameters

节点编号	能源类型	$P_i^{\min}/\text{MW}$	$P_i^{\max}/\text{MW}$	二次系数	一次系数	常数项
1	发电机 1	50	300	0.061 8	13.166	430
2	发电机 2	50	400	0.092 8	13.660	510
3	发电机 3	50	350	0.082 8	13.005	560
4	柔性负荷 1	50	300	0.302 0	6.012	220
5	柔性负荷 2	50	300	0.421 0	6.305	230
6	储能单元	-30	150	-0.587 0	—	—

表 2 发电机环境调度参数

Table 2 Generator environmental scheduling parameters

节点编号	能源类型	f_i	e_i	d_i
1	发电机 1	0.060 8	13.077	230
2	发电机 2	0.061 2	13.013	300
3	发电机 3	0.063 6	13.084	350

5.1 通信拓扑优化前后仿真

令各分布式电源初始一致性变量值为(32, 30, 24, 36, 26, 31), 初始输出功率由一致性变量计算, 可再生能源机组功率为 300 MW, 功率交换指

令为 100 MW, 利用通信拓扑权重计算得到的邻接矩阵所对应的特征值集合为{1, 0.888, 0.593, 0.224, -0.278, -0.093}。利用本文所提出的通信拓扑优化模型得到的邻接矩阵对应的特征值集合为{1, 0.666, 0.666, 0, 0, -0.333}。通信拓扑优化后邻接矩阵的绝对值第 2 大特征值(0.666)与优化前(0.888)相比, 降低了约 1/4。在上述仿真条件下验证通信拓扑优化前后各节点一致性变量和节点功率的收敛情况, 仿真结果如图 5、图 6 所示。

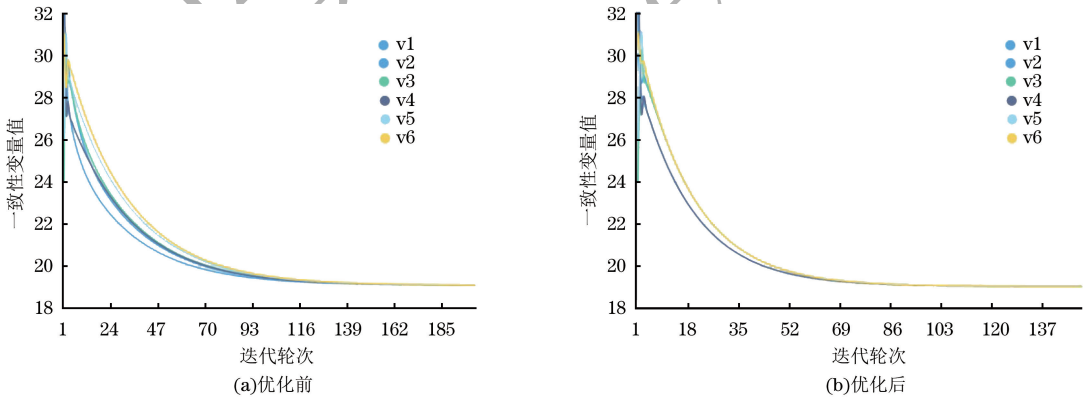


图 5 通信拓扑优化前后一致性变量值的收敛曲线

Fig. 5 Convergence curves of consistency variable values before and after communication topology optimization

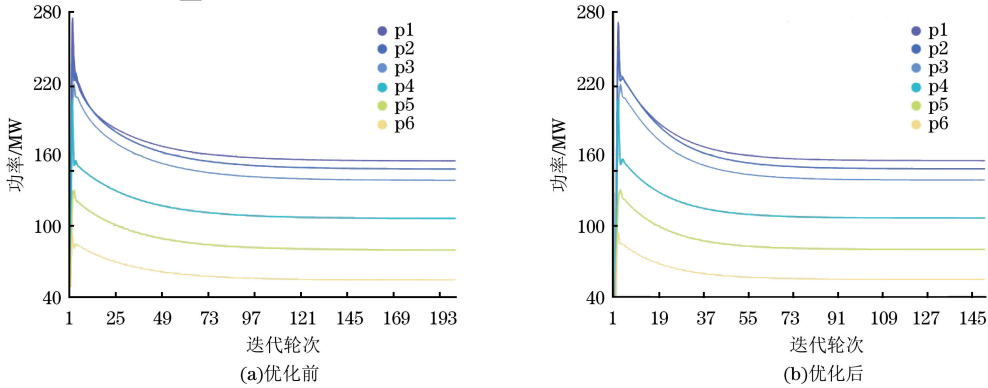


图 6 通信拓扑优化前后各节点功率变化曲线

Fig. 6 Power change curve of each node before and after communication topology optimization

从图 5、图 6 可知, 一致性变量值在算法优化前后收敛值均达到 19.07, 各节点功率在算法优化前后收敛值均达到[154.29, 147.44, 137.97, 105.96,

79.48, 54.16] MW。通信拓扑优化前一致性算法迭代至第 185 次时一致性变量和各节点功率达到收敛值, 算法优化后迭代至第 116 次即达到收敛值。

仿真结果表明,本文通信拓扑优化的一致性算法有效提高了一致性变量和节点功率的收敛速度。

5.2 领导节点切换仿真

令可再生能源机组功率为 300 MW,功率交换指令为 100 MW,初始领导节点为 1 号节点,迭代至第 30 轮,即尚未达到收敛时,切换为 4 号节点,到第 151 轮时领导节点切换为 2 号节点。在上述条件下验证领导节点切换在未收敛阶段和已收敛阶段对调度过程的影响,仿真结果如图 7、图 8 所示。

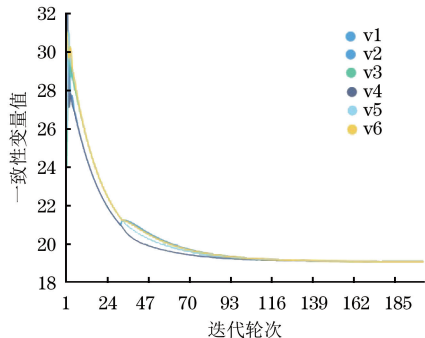


图 7 领导节点切换情况下一致性变量值收敛曲线
Fig.7 Convergence curve of consistency variable values in case of leader node switching

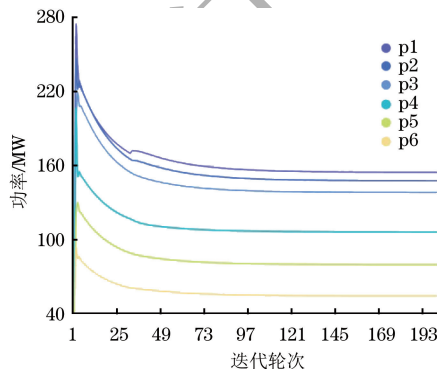


图 8 领导节点切换情况下各节点功率变化曲线
Fig.8 Power change curve of each node in the case of leader node switching

从图 7 和图 8 可以看出,初始状态 1 号节点为领导节点,当迭代至第 30 轮时系统还未达到平衡,领导节点切换为 4 号节点继续迭代,迭代至第 145 次时系统达到平衡,此时一致性变量的值为 19.09,各节点的功率为[154.47,147.58,138.06,105.98,79.52,54.20] MW。与图 5(b)和图 6(b)相比,迭代轮次有少量滞后,达到平衡后收敛值近似,收敛过程较平滑。在第 151 次时领导节点切换为 2 号节点,此时系统仍然是平衡状态,一致性变量和各节点功率均保持不变,说明达到平衡后领导节点变化对收敛过程无影响。上述仿真验证了在领导节点切换的情况下,本文提出的策略一致性变量和功率仍能达到较好的收敛。

5.3 节点退出与加入仿真

令可再生能源机组功率为 300 MW,交换功率指令为 100 MW,领导节点为 1 号节点。

1) 迭代至第 30 轮时(系统未达到收敛状态)5 号节点宕机,出力归 0,退出调度;至第 70 轮时(系统未达到收敛状态)5 号节点恢复正常,重新加入调度。在上述条件下验证系统节点退出与加入对一致性变量和功率分配的影响。

2) 迭代至第 50 轮时(系统未达到收敛状态)5 号节点宕机,出力归 0,退出调度;剩余 5 个节点调整出力,至第 110 轮次时系统达到平衡收敛状态;在第 150 轮时 5 号节点恢复正常,重新加入调度。在上述条件下验证系统节点退出与加入对一致性变量和功率分配的影响。

3) 迭代至第 120 轮时(至第 116 轮次时系统达到收敛状态)5 号节点宕机,出力归 0,退出调度;剩余 5 个节点调整出力,至第 180 轮次时系统达到平衡收敛状态;在第 240 轮时 5 号节点恢复正常,重新加入调度。在上述条件下验证节点退出与加入对一致性变量和功率分配的影响。

对不同阶段的节点退出与加入情况进行仿真,得到一致性变量和节点功率变量情况如图 9、图 10 所示。

1) 从图 9(a)和图 10(a)可知,各节点迭代至第 30 轮时(未达到收敛状态)5 号节点退出,其出力变为 0,配电网处于失衡状态,其余 5 个节点重新调整出力。经过第 40 轮次迭代后,配电网此时还未达到平衡状态,5 号节点恢复,经过第 123 次迭代后系统达到平衡状态,各节点的一致性变量收敛到 19.07,各节点的功率为[154.14,147.26,137.80,105.84,79.37,54.08] MW,与未有节点退出、加入时数值相当,且收敛过程平滑。

2) 从图 9(b)和图 10(b)可知,各节点迭代至第 50 轮时(系统尚未达到收敛状态)5 号节点退出,此节点的出力变为 0,配电网处于失衡状态,其余 5 个节点重新调整出力。经过第 60 次迭代后,系统处于平衡状态。此时一致性变量值收敛为 13.65,各节点功率分别为[110.49,105.61,98.82,75.86,0,38.78] MW。在第 150 轮时 5 号节点恢复出力,经过第 112 次迭代后各节点的一致性变量值重新收敛到 19.07,各个节点的功率分别为[154.29,147.21,137.75,105.81,79.34,54.06] MW,与未有节点退出、加入时数值相当,且收敛过程平滑。

3) 从图 9(c)和图 10(c)可知,系统迭代至第 116 轮时,各节点的一致性变量值收敛到 19.07,

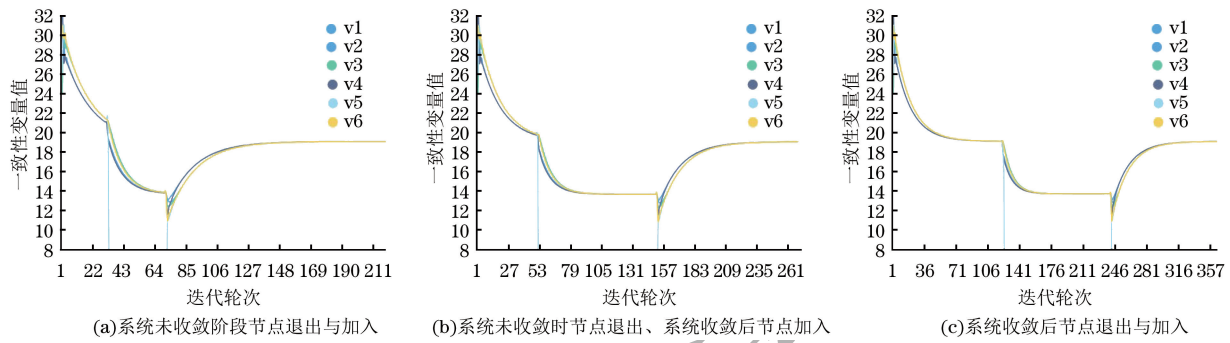


图 9 节点退出与加入情况下一致性变量值曲线

Fig. 9 Plot of consistency variable values curve in case of node exit and joining

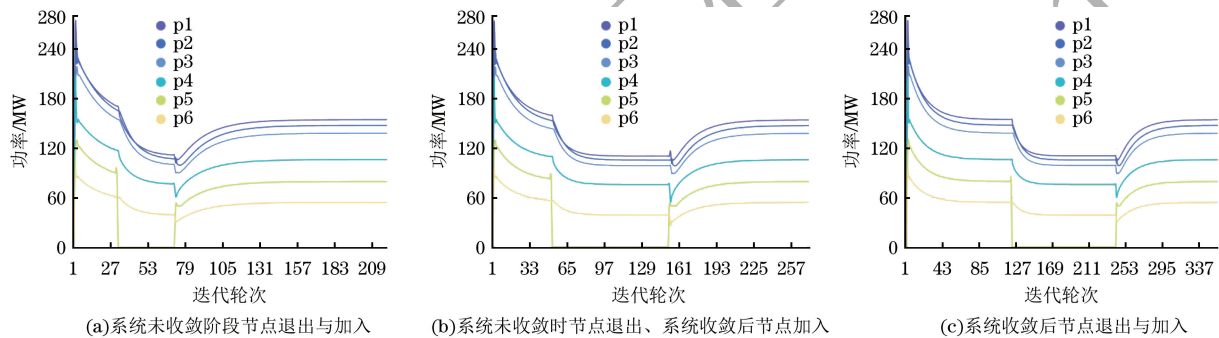


图 10 节点退出与加入情况下各节点功率变化曲线

Fig. 10 Power variation curves of each node in the case of node exit and joining

各个节点的功率也达到稳定状态,其值分别为 $[154.34, 147.49, 138.02, 105.98, 79.50, 54.17]$ MW。在第 120 轮时 5 号节点退出,此节点的出力变为 0,配电网处于失衡状态,其余 5 个节点重新调整出力。经过第 60 次迭代后,系统一致性变量值收敛为 13.65,重新处于平衡稳定状态,此时各节点的功率分别为 $[110.46, 105.58, 98.79, 75.84, 0, 38.77]$ MW。到第 240 轮时 5 号节点恢复,各节点重新调整出力;经过第 105 次迭代后各个节点的一致性变量值重新收敛到 19.07,各个节点的功率分别为 $[154.34, 147.49, 138.02, 105.98, 79.40, 54.27]$ MW,与 5 号节点退出前的状态相当,且收敛过程平滑。

由上述仿真可知,本文提出的策略能够在节点退出与加入的情况下保证一致性变量和功率达到平滑的收敛,系统具有较高的稳定性。

5.4 功率交换指令变动仿真

令可再生能源机组功率为 300 MW,初始功率交换指令为 -100 MW,领导节点为 1 号节点。

1) 迭代至第 40 轮时(系统未达到平衡)功率交换指令变为 0,在第 80 轮时(系统未达到平衡)功率交换指令变为 100 MW。

2) 迭代至第 120 轮时(第 100 轮次系统达到平衡)功率交换指令变为 0,第 240 轮时(第 220 轮次系统达到平衡)功率交换指令变为 100 MW。

对不同阶段的功率交换指令变动情况进行仿真,得到一致性变量和节点功率变化情况如图 11、图 12 所示。

1) 从图 11(a)和图 12(a)可知,各节点迭代至第 40 轮次时(未达到收敛状态),将功率交换指令设置为 0,经过第 40 轮次迭代后,配电网此时还未达到平衡状态,将功率交换指令设置为 100 MW,经过第 118 次迭代后系统达到平衡状态,各个节点的一致性变量值收敛为 19.07,各节点功率分别为 $[154.34, 147.49, 138.02, 105.98, 79.50, 54.17]$ MW,与功率交换指令未变动时数值相当,且收敛过程平滑。

2) 从图 11(b)和图 12(b)可知,经过第 100 次迭代之后,各节点的一致性变量值收敛为 38.08,各节点功率分别为 $[308.12, 294.35, 275.44, 211.58, 158.65, 108.11]$ MW,供需达到平衡。在第 120 次迭代时,功率交换指令变为 0,经过第 100 次迭代之后,各个节点的一致变量值收敛为 28.62,各节点功率分别为 $[231.59, 221.33, 207.11, 159.02, 119.29, 81.29]$ MW,供需达到平衡。在第 240 次迭代时,将功率交换指令设置为 100 MW,经过第 114 次迭代之后,各个节点的一致变量值收敛为 19.07,各节点功率分别为 $[154.34, 147.50, 138.02, 105.98, 79.50, 54.17]$ MW,与功率交换指令未变动时数值相当,且收敛过程平滑。

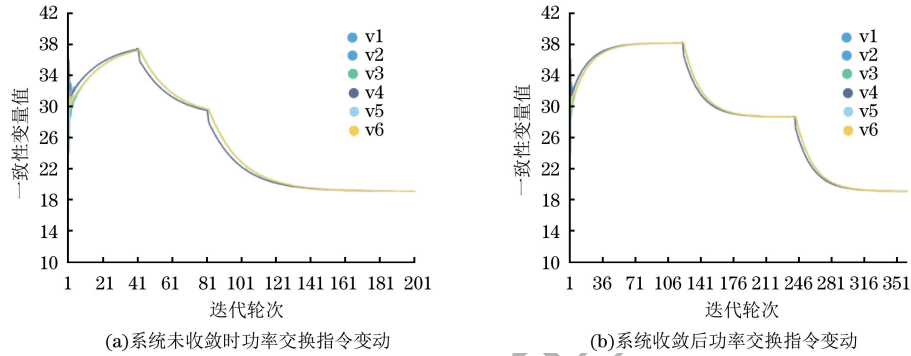


图 11 功率交换指令变动时一致性变量值曲线

Fig. 11 Consistency variable values curve when power switching command is changed

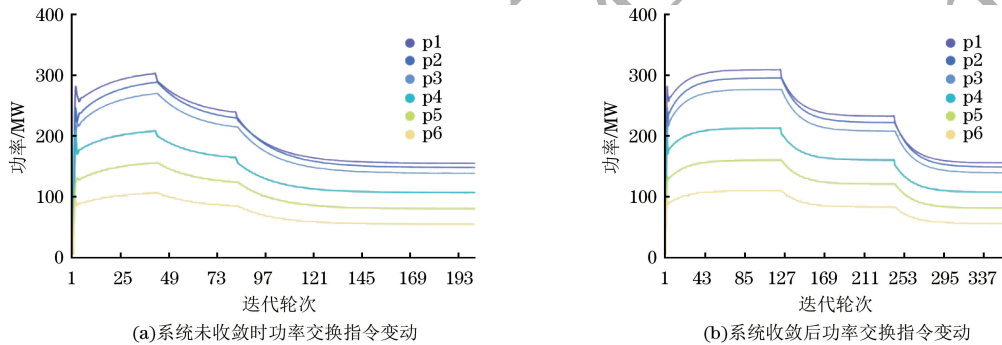


图 12 功率交换指令变动时各节点功率分布

Fig. 12 Output power of each power supply under network loss fluctuation

上述仿真结果表明,本文提出的策略在功率交换指令变动的场景下仍取得良好的效果。

5.5 收敛系数 ϵ 变动仿真

令可再生能源机组功率为300MW,功率交换指

令为100 MW,领导节点为1号节点。分别取收敛系数为0.005、0.02和0.1时验证对系统收敛速度的影响。在上述条件下验证收敛系数变动对一致性变量和功率分配的影响,仿真结果如图13、图14所示。

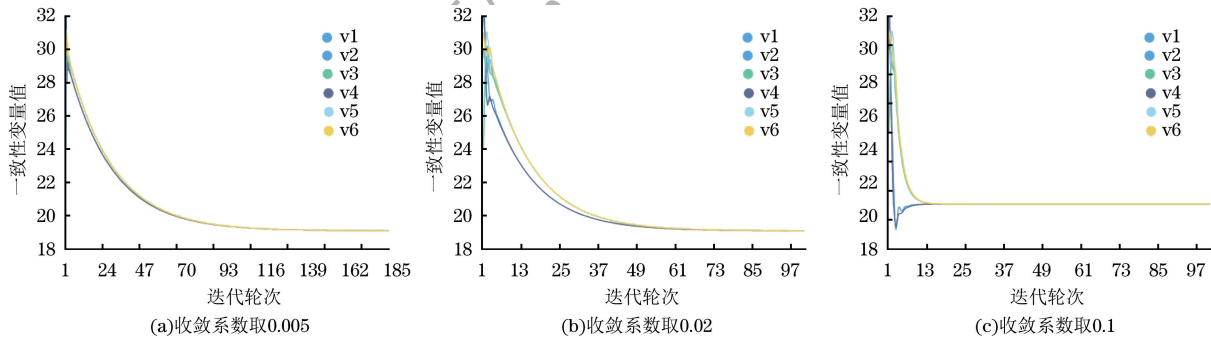


图 13 收敛系数变动情况下一致性变量值曲线

Fig. 13 Consistency variable values curve under variation of convergence coefficient

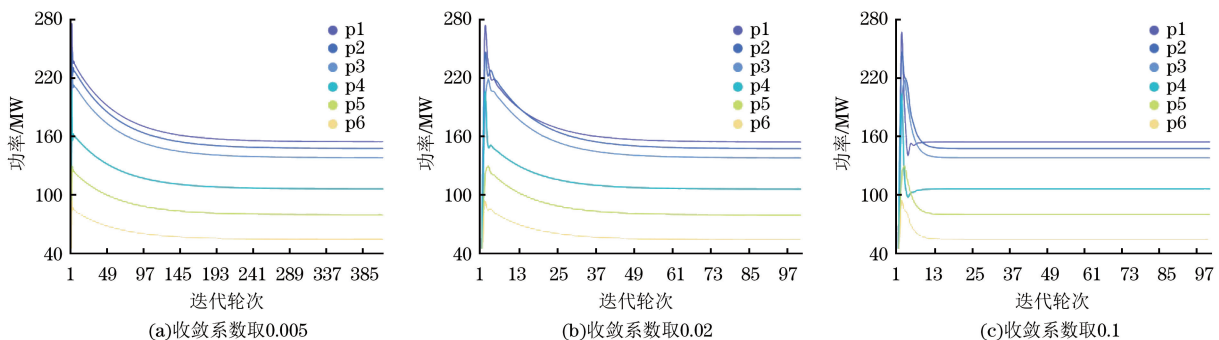


图 14 收敛系数变动情况下各节点功率变化曲线

Fig. 14 Power variation curve of each node under variation of convergence coefficient

从图 13 和图 14 可知,收敛系数取 0.005 时,配电网系统经过第 357 次迭代之后,各个节点的一致性变量值收敛为 19.07,各节点功率分别为[154.36, 147.49, 138.02, 105.99, 79.50, 54.17] MW,供需达到平衡,一致性变量及功率收敛速度过慢。当收敛系数为 0.02 时,配电网系统经过第 97 次迭代之后,各个节点的一致性变量值收敛为 19.07,各节点功率分别为[154.33, 147.49, 138.02, 105.97, 79.50, 54.17] MW,供需达到平衡;一致性变量和功率收敛速度较快,但收敛过程中振幅有一定波动。收敛系数取 0.1 时,配电网系统经过第 18 次迭代之后,各个节点的一致性变量值收敛为 19.07,各节点功率分别为[154.2, 147.49, 138.01, 105.87, 79.50, 54.18] MW,供需达到平衡;收敛速度快,但一致性变

量及功率收敛过程中振幅过大,不利于系统的稳定。

本文收敛系数取 0.015,配电网系统经过第 116 次迭代之后,各个节点的一致性变量值收敛为 19.07,各节点功率分别为[154.33, 147.49, 138.02, 105.97, 79.50, 54.17] MW,供需达到平衡;一致性变量和功率收敛速度较快,且收敛过程中振幅不明显。

5.6 权重系数不同仿真

令可再生能源机组功率为 300 MW,功率交换指令为 100 MW,领导节点为 1 号节点。分别取权重系数 $w_1=0.5, 0.6, 0.75$ 和 $w_2=0.5, 0.4, 0.25$,验证对系统收敛速度的影响。在上述条件下验证权重系数不同对一致性变量和功率分配的影响,仿真结果如图 15、图 16 所示。

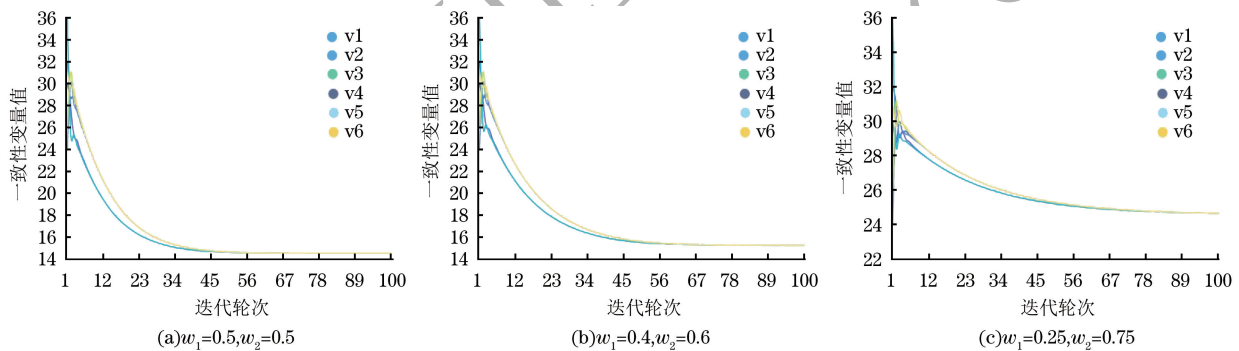


图 15 权重系数不同时一致性变量值曲线

Fig. 15 Curve of consistency variables values with different weight coefficients

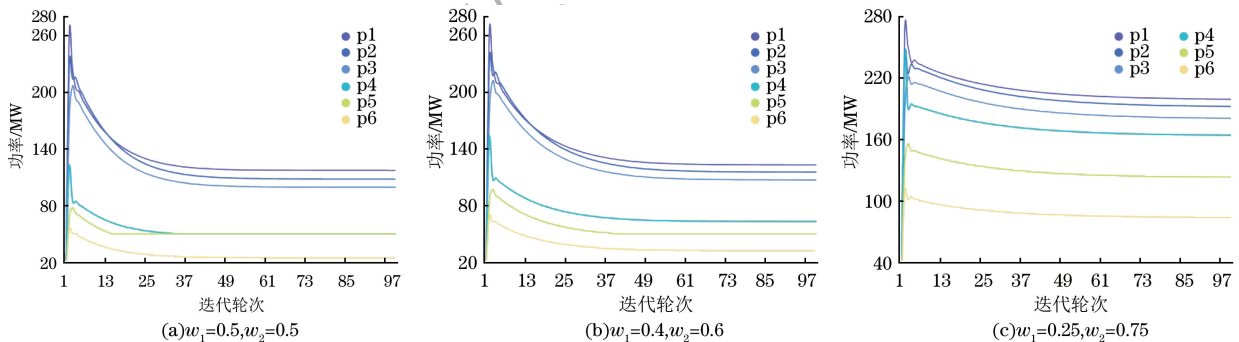


图 16 权重系数不同时各节点功率变化曲线

Fig. 16 Power variation curve of each node with different weight coefficients

从图 15 和图 16 可知,当权重系数 $w_1=0.5$ 、 $w_2=0.5$ 时,配电网系统经过第 65 次迭代之后,各个节点的一致性变量值收敛为 14.5,各节点功率分别为[117.33, 108.29, 99.66, 50, 50, 24.72] MW,供需达到平衡。但此时柔性负荷功率达到最小值,无法实现柔性负荷用电效益最大化。当权重系数 $w_1=0.4$ 、 $w_2=0.6$ 时,配电网系统经过第 80 次迭代之后,各个节点的一致性变量值收敛为 15.23,各节点功率分别为[123.24, 115.73, 107.38, 63.47, 50, 32.45] MW,供需达到平衡。但此时仍存在柔性

负荷功率为最小值,同样无法实现柔性负荷用电效益最大化。在权重系数 $w_1=0.25$ 、 $w_2=0.75$ 时,配电网系统经过第 98 次迭代之后,各个节点的一致性变量值收敛为 24.63,各节点功率分别为[199.28, 192.23, 180.67, 164.21, 123.22, 83.96] MW,供需达到平衡,根据得到的各节点功率和分配的权重系数计算得到的总成本为 11 536.4 元。

当本文权重系数 $w_1=0.3$ 、 $w_2=0.7$ 时,配电网系统经过第 116 次迭代之后,各个节点的一致性变量值收敛为 19.07,各节点功率分别为[154.33,

147.49, 138.02, 105.97, 79.50, 54.17] MW, 计算得到的总成本为 8 539.7 元, 小于权重系数 $w_1=0.25$ 、 $w_2=0.75$ 时计算得到的总成本, 因此本文选择权重系数 $w_1=0.3$ 、 $w_2=0.7$ 是较为合适的, 能够使配电网达到合理的功率分配。

5.7 与多目标算法 NSGA-II 的对比仿真

令可再生能源机组功率为 300 MW, 功率交换指令为 100 MW。将本文算法与多目标算法 NSGA-II^[25] 进行对比, 多目标算法 NSGA-II 在上述条件下得到的解集如图 17 所示。

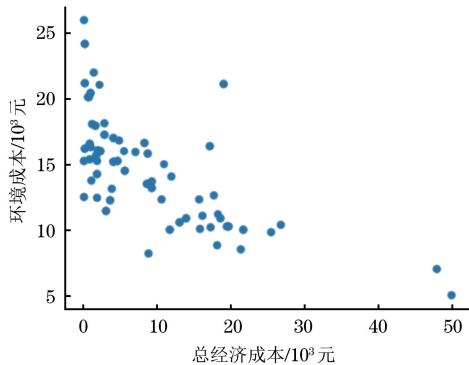


图 17 多目标算法 NSGA-II 得到的解集
Fig.17 The solution set obtained by multi-objective algorithm NSGA-II

从图 17 可知, 由 NSGA-II 算法得到的最优解分别为 [135.3, 192.76, 170.09, 116.60, 106.74, 45.98] MW, 即每个节点所分配的功率值。本文算法得到的各节点功率值分别为 [154.29, 147.44, 137.97, 105.96, 79.48, 54.16] MW。由表 3 可知: NSGA-II 算法求得的最优解, 其环境成本为 12 610.1 元, 经济成本为 3 133.87 元; 本文算法所求得的环境成本为 10 609.9 元, 经济成本为 2 329.03 元。可见, 本文算法求得的环境成本和经济成本均小于 NSGA-II 算法求得的两项成本。因此本文在综合考虑两种成本下, 通过选择合适的权重系数可以满足配电网中功率的合理分配。

表 3 与多目标算法 NSGA-II 对比

Table 3 Comparison with multi-objective

algorithm NSGA-II		单位: 元
算法	环境成本	经济成本
NSGA-II	12 610.1	3 133.87
本文算法	10 609.9	2 329.03

5.8 与快速一致性算法的对比仿真

令可再生能源机组功率为 300 MW, 功率交换指令为 100 MW, 领导节点为 1 号节点, 收敛系数取 0.15。将本文算法与文献[26]提出的快速一致性算法进行对比, 快速一致性算法在上述条件下

的一致性变量和功率分配的仿真结果如图 18、图 19 所示。

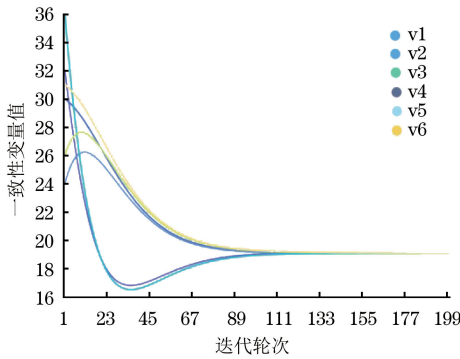


图 18 快速一致性算法下一致性变量值曲线
Fig.18 Curve of consistency variables values under fast consistency algorithm

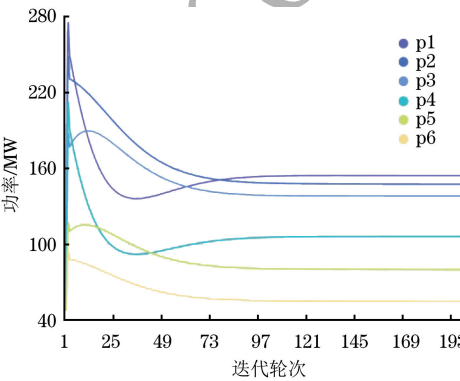


图 19 快速一致性算法下各节点功率变化曲线
Fig.19 Power variation curve of each node under fast consistency algorithm

从图 18 和图 19 可知, 采用快速一致性算法的配电网系统经过第 187 次迭代后, 各个节点的一致性变量值收敛为 19.07, 各节点功率分别为 [154.23, 147.41, 137.92, 105.87, 79.48, 54.17] MW, 而本文提出的算法在经过第 116 次迭代后达到收敛值。通过对比可知, 本文算法的收敛速度要优于快速一致性算法。因而本文算法不仅实现了系统功率的合理分配, 还有效提高了系统的收敛速度。

6 结束语

本文提出一种 FISCO BCOS 平台下结合通信拓扑优化一致性算法的配电网多目标经济调度策略, 通过区块链机制解决分布式经济调度中全局信息共享难和安全性不足的问题, 实现配电网最小成本的最优功率分配, 并在多种场景下验证了本文调度策略的有效性。本文建立一种综合考虑污染气体排放、传统发电机发电成本、储能成本、柔性负荷用电效益的配电网多目标经济调度模型; 设计通信拓扑优化的数学规划模型, 以邻接矩阵绝对值第 2 大

特征值最小为通信拓扑优化目标,有效提高了系统的收敛速度;提出 FISCO BCOS 平台结合通信拓扑优化一致性算法的多目标经济调度策略,解决了分布式经济调度中全局信息共享难和安全性不足的问题,可有效防止部分节点作恶,实现配电网最小成本的最优功率分配。本文多目标经济调度策略对主动配电网中领导节点切换、节点加入或退出、功率交换指令变动、收敛系数变动的场景,具有良好的鲁棒性和稳定性。仿真结果表明,本文一致性算法中各目标权重系数选取恰当,使配电网各单元功率分配合理,经济与环境结果均优于多目标 NSGA-II 算法,并与快速一致性算法进行了对比,结果表明本文一致性算法收敛速度更快。在配电网多目标经济调度的后续研究工作中将考虑风能、光伏等可再生能源调度过程中的不确定性,以及多节点参与调度的情况,使研究更贴近结构复杂的实际配电网系统。

参考文献

- [1] LU Y, XIANG Y, HUANG Y, et al. Deep reinforcement learning based optimal scheduling of active distribution system considering distributed generation, energy storage and flexible load[J]. *Energy*, 2023, 271: 127087.
- [2] 黄伟, 黄婷, 周欢, 等. 基于改进微分进化算法的微电网动态经济优化调度[J]. *电力系统自动化*, 2014, 38(9): 211-217.
HUANG W, HUANG T, ZHOU H, et al. Dynamic economical dispatch for microgrid based on improved differential evolution algorithm[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2014, 38(9): 211-217. (in Chinese)
- [3] WENG H, YU X H, LIU Z W. Recent progress on the study of distributed economic dispatch in smart grid: an overview [J]. *Frontiers of Information Technology & Electronic Engineering*, 2021, 22(1): 25-39.
- [4] 李军徽, 马得轩, 朱星旭, 等. 基于 ADMM 算法的主动配电网分层优化经济调度[J]. *电力建设*, 2022, 43(8): 76-86.
LI J H, MA D X, ZHU X X, et al. Multi-level optimization of economic dispatching based on ADMM algorithm for active distribution network[J]. *Electric Power Construction*, 2022, 43(8): 76-86. (in Chinese)
- [5] 黄悦华, 邱元城, 张磊, 等. 考虑主从博弈的电热能源系统优化调度[J]. *电力系统及其自动化学报*, 2024, 36(9): 115-123.
HUANG Y H, QIU Y C, ZHANG L, et al. Optimal scheduling of electric and thermal energy systems considering stackelberg game[J]. *Proceedings of the CSU-EPSA*, 2024, 36(9): 115-123. (in Chinese)
- [6] 李浩宇, 张春, 吴零晨, 等. 基于改进有限时间一致性的微电网经济优化调度[J]. *电力系统及其自动化学报*, 2024, 36(7): 38-48.
LI H Y, ZHANG C, WU L C, et al. Economic optimal dispatching of microgrid based on improved finite time consistency [J]. *Proceedings of the CSU-EPSA*, 2024, 36(9): 115-123. (in Chinese)
- [7] 张笑演, 王楷裕, 黄蕾, 等. 考虑扩展碳排放流和碳交易议价模型的园区综合能源优化调度[J]. *电力系统自动化*, 2023, 47(9): 34-46.
ZHANG X Y, WANG L Y, HUANG L, et al. Optimal dispatching of park-level integrated energy system considering augmented carbon emission flow and carbon trading bargain model[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2023, 47(9): 34-46. (in Chinese)
- [8] 陈雨婷, 赵毅, 吴俊达, 等. 考虑碳排放指标的配电网经济调度方法[J]. *上海交通大学学报*, 2023, 57(4): 442-451.
CHEN Y T, ZHAO Y, WU J D, et al. Economic dispatch method of distribution network considering carbon emission index[J]. *Journal of Shanghai Jiao Tong University*, 2023, 57(4): 442-451. (in Chinese)
- [9] 朱乔红, 龙英文, 余粟. 基于优化一致性算法的微网功率经济分配策略[J]. *传感器与微系统*, 2021, 40(1): 60-62, 70.
ZHU Q H, LONG Y W, YU S. Economic dispatch strategy of power for microgrid based on optimal consistency algorithm[J]. *Transducer and Microsystem Technologies*, 2021, 40(1): 60-62, 70. (in Chinese)
- [10] DONGMO E, GADOW R, KILLINGER A, et al. Modeling of combustion as well as heat, mass, and momentum transfer during thermal spraying by HVOF and HVSFS[J]. *Journal of Thermal Spray Technology*, 2009, 18(5): 896-908.
- [11] 米阳, 彭建伟, 陈博洋, 等. 基于一致性原理和梯度下降法的微电网完全分布式优化调度[J]. *电力系统保护与控制*, 2022, 50(15): 1-10.
MI Y, PENG J W, CHEN B Y, et al. Fully distributed optimal dispatch of a microgrid based on consensus principle and gradient descent [J]. *Power System Protection and Control*, 2022, 50(15): 1-10. (in Chinese)
- [12] LIANG G Q, WELLER S R, LUO F J, et al. Distributed blockchain-based data protection framework for modern power systems against cyber attacks[J]. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 2019, 10(3): 3162-3173.
- [13] 贾乾罡, 陈思捷, 严正, 等. 基于区块链的空调负荷用电权分配: 模式与方法[J]. *中国电机工程学报*, 2020, 40(11): 3393-3402.
JIA Q G, CHEN S J, YAN Z, et al. Blockchain-enabled power usage quotas allocation method for air conditioning loads[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2020, 40(11): 3393-3402. (in Chinese)
- [14] 李彬, 覃秋悦, 祁兵, 等. 基于区块链的分布式能源交易方案设计综述[J]. *电网技术*, 2019, 43(3): 961-972.
LI B, QIN Q Y, QI B, et al. Design of distributed energy trading scheme based on blockchain [J]. *Power System Technology*, 2019, 43(3): 961-972. (in Chinese)
- [15] 旋逸昭, 赵红武, 金瑜. 一种基于双链的区块链共识机制[J]. *计算机工程*, 2024, 50(5): 139-148.
XUAN Y Z, ZHAO H W, JIN Y. A dual-chain-based consensus mechanism for blockchain [J]. *Computer Engineering*, 2024, 50(5): 139-148. (in Chinese)
- [16] 郑雅男. 基于能源区块链的微电网调度及交易方法[D]. 北京: 华北电力大学, 2019.
ZHENG Y N. Microgrid scheduling and trading method based on energy blockchain [D]. Beijing: North China Electric Power University, 2019. (in Chinese)
- [17] VACCA A, DI SORBO A, VISAGGIO C A, et al. A systematic literature review of blockchain and smart contract development: techniques, tools, and open challenges [J]. *Journal of Systems and Software*, 2021, 174: 110891.
- [18] 梁燕, 洪文超, 邵凯. 异步区块链支持的安全频谱共享[J]. *电讯技术*, 2023, 63(10): 1464-1471.
LIANG Y, HONG W C, SHAO K. Secure spectrum sharing supported by asynchronous blockchain [J]. *Telecommunication Engineering*, 2023, 63(10): 1464-1471. (in Chinese)
- [19] 王森, 李志淮, 贾志鹏. 主节点随机选取的改进 PBFT 共识算法[J]. *计算机应用与软件*, 2022, 39(10): 299-306.
WANG S, LI Z H, JIA Z P. Improved pbft consensus algorithm with random selection of master nodes [J]. *Computer Applications and Software*, 2022, 39(10): 299-306. (in Chinese)

- [20] 蒲天骄, 刘威, 陈乃仕, 等. 基于一致性算法的主动配电网分布式优化调度[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(6): 1579-1590.
- PUT J, LIU W, CHEN N S, et al. Distributed optimal dispatching of active distribution network based on consensus algorithm[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(6): 1579-1590. (in Chinese)
- [21] WU T, KURODA S, KAWAKITAM J, et al. Processing and properties of titanium produced by warm spraying[C]// Proceedings of the 2006 International Thermal Spray Conference. Washington D. C., USA: IEEE Press, 2006: 458-466.
- [22] 杨洪朝, 杨迪, 孟科. 高比例可再生能源渗透下多虚拟电厂多时间尺度协调优化调度[J]. 智慧电力, 2021, 49(2): 60-68.
- YANG H Z, YANG D, MENG K. Multi-time scale coordination optimal scheduling of multiple virtual power plants with high-penetration renewable energy integration[J]. Smart Power, 2021, 49(2): 60-68. (in Chinese)
- [23] 徐熙林, 宋依群, 姚良忠, 等. 主动配电网源-荷-储分布式协调优化运行(一): 基于一致性理论的分布式协调控制系统建模[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(10): 2841-2848, 3135.
- XU X L, SONG Y Q, YAO L Z, et al. Source-load-storage distributed coordinative optimization of AND (part I): consensus based distributed coordination system modeling[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(10): 2841-2848, 3135. (in Chinese)
- [24] 崔杨, 周慧娟, 仲悟之, 等. 考虑源荷两侧不确定性的含风电电力系统低碳调度[J]. 电力自动化设备, 2020, 40(11): 85-91.
- CUI Y, ZHOU H J, ZHONG W Z, et al. Low-carbon scheduling of power system with wind power considering uncertainty of both source and load sides[J]. Electric Power Automation Equipment, 2020, 40(11): 85-91. (in Chinese)
- [25] 郝晓弘, 何侃. 基于 NSGA-II 算法的含风电场的电力系统动态经济调度[J]. 电子设计工程, 2017, 25(11): 170-175.
- HAO X H, HE K. Dynamic economic dispatch considering wind power penetration based on NSGA-II [J]. Electronic Design Engineering, 2017, 25(11): 170-175. (in Chinese)
- [26] HUANG L Y, SUN C, FAN S, et al. Fast consensus algorithm of multi-agent systems with double gains regulation[J]. International Journal of Control, 2017, 90(5): 1123-1131.

编辑 索书志