

# 面向碳减排与弹性提升的交直流混合配电网协同优化调控方法

洪福斌<sup>1</sup>,蔡小辰<sup>2</sup>,刘贵<sup>3</sup>,陈昊<sup>4</sup>,马兆兴<sup>5</sup>

(1. 国网电易数字科技(雄安)有限公司,河北 保定 071700;2. 国网电力科学研究院有限公司,南京 211106;3. 国网电力科学研究院有限公司(南瑞集团有限公司),南京 211106;4. 国网江苏省电力有限公司 南京供电分公司,南京 210019;5. 青岛理工大学 信息与控制工程学院,山东 青岛 266520)

**摘要:**在“双碳”目标的指引下,交直流混合配电网络已逐渐成为配电系统未来发展的重要方向。然而,碳减排与提升电力网络弹性这两大需求之间存在一定矛盾,难以高效协同。鉴于此,提出了一种基于近似纳什均衡的交直流混合配电网协同优化方法。首先探讨了不同条件下,碳减排与弹性对交直流配电网络运行的影响;随后,提出了考虑碳减排的协同调控模型,并提出了弹性评估的度量指标,在此基础上设计了优化运行的近似纳什均衡策略。最终,以达成均衡的碳减排、经济性、弹性作为优化目标,构建起交直流混合配电网的优化调控模型。通过改进的IEEE33节点算例和雄安新区某园区算例进行计算分析,验证了所提方法对降低碳排放、提升经济性与弹性的有效性和可行性。

**关键词:**近似纳什均衡;交直流混合配电网;弹性;经济性;碳减排

## Collaborative optimization and control method for AC/DC hybrid distribution network aimed at carbon reduction and resilience

HONG Fubin<sup>1</sup>, CAI Xiaochen<sup>2</sup>, LIU Gui<sup>3</sup>, CHEN Hao<sup>4</sup>, MA Zhaoxing<sup>5</sup>

(1. State Grid Elec-Ease Digital Technology (Xiong'an) Co., Ltd., Baoding 071700, China;2. State Grid Electric Power Research Institute, Nanjing 211106, China;3. State Grid Electric Power Research Institute (NARI Group Corporation), Nanjing 211106, China;4. Nanjing Power Supply Branch, State Grid Jiangsu Electric Power Co., Ltd., Nanjing 210019, China;5. School of Information and Control Engineering, Qingdao University of Technology, Qingdao 266520, China)

**Abstract:** Guided by the “dual carbon” goal, the AC/DC hybrid distribution network has gradually become an important direction for the future development of the distribution system. However, a certain contradiction exists between the two major demands of carbon reduction and improvement of power network resilience, and their efficient coordination is hampered. In view of this, a collaborative optimization method for AC/DC hybrid distribution networks based on approximate Nash equilibrium is proposed. Firstly, the impact of carbon reduction and resilience on the operation of AC/DC distribution networks under different conditions is explored. Subsequently, a collaborative regulation model considering carbon emissions reduction is proposed, and a measurement index for resilience evaluation is proposed. Based on this, an approximate Nash equilibrium strategy for optimized operation is designed. Ultimately, with the optimization goals of achieving balanced carbon reduction, economy, and resilience, an optimization and control model for the AC/DC hybrid distribution network is constructed. The effectiveness and feasibility of the proposed method in reducing carbon emissions, improving economic efficiency and resilience are verified through improved IEEE33-node examples and a certain park example in Xiong'an New Area.

**Key words:** approximate Nash equilibrium; AC/DC distribution network; resilience; economy; carbon emission

## 0 引言

为实现“双碳”目标,构建以可再生能源为主体

的新型电力系统已成为全球共识<sup>[1-2]</sup>。在这进程中,提升电能在终端消费中占比需解决2个核心问题:①如何高效消纳波动性可再生能源;②增强分布式电源承载能力的同时提升配网弹性,以应对可能发生的诸多随机问题。传统交流配电网在接入高比例分布式电源时面临电能质量恶化、控制复杂度剧增等挑战<sup>[3-4]</sup>。截至2024年,我国已建成雄安新

收稿日期:2025-10-21;修回日期:2025-11-25

基金项目:国家自然科学基金资助项目(62203248);电网运行风险防御技术与装备全国重点实验室资助项目(SGSR0000KJJS2302137)

区交直流配电工程等12个交直流混合配电网标杆项目,其可再生能源消纳能力提升25%~40%。国际能源署在《全球能源转型展望》中指出,交直流混合组网将成为未来十年配网升级的主流<sup>[5-6]</sup>。

针对交直流混合配电网可靠运行,如何兼顾碳减排和提高弹性是一个较大难点,主要体现在:①提高极端环境下配网弹性会在一定程度上降低新能源注入,不利于碳减排;②新能源发电的不确定性、间歇性特征,对配电网灾后快速恢复产生较大不利影响。提高新能源发电注入比和加强配网弹性,二者之间存在一定互斥关系<sup>[7]</sup>,如何均衡考虑该问题是配网运行难题,关于这方面研究鲜有出现。现有研究表明,采用博弈论能有效协调配电网多目标优化问题<sup>[8-9]</sup>。该方法通过建立多主体谈判模型,模拟实际决策过程中利益博弈与协商机制,其优势体现在能够准确量化不同优化目标间的量级差异关系。

在文献[10]考虑电池储能老化和需求侧响应的基础上,提出交直流混合配电网动态重构方法。文献[11]提出一种交直流混合配电网无功电压分布式优化调控方法,构建网损和节点电压偏差的目标函数。针对交直流混合配电网协同规划,文献[12]提出一种双层规划模型,综合考虑了源-网-荷-储协同优化。然而,上述文献考虑了常态化运行工况,对可能发生的极端灾害天气致电网扰动影响研究较少。针对配电网经济调控,文献[13]给出多层博弈的优化调控模型。文献[14]考虑极端值灾害下配电网弹性提升技术问题。现有研究在配电网弹性规划方面存在以下局限性:①对低发生概率但具有灾难性后果的极端气候事件影响配电网长期可靠性的机理研究不够深入,缺乏系统性风险评估框架;②现有规划模型过度聚焦于提升电网弹性指标,未能统筹考虑新型电力系统发展的多目标,忽视了高比例可再生能源并网背景下,电网规划必须满足的深度减排要求,未能有效协调弹性提升与低碳转型之间的协同优化关系。这种单目标导向的规划范式可能导致资源配置失衡,无法构建真正适应气候变化的新型电力系统。

近似纳什均衡是纳什均衡的一种放宽形式,它允许参与者在偏离均衡策略时获得的额外收益不超过某个常数,这在处理大型博弈或策略空间复杂的博弈时较有用,因为找到精确纳什均衡可能非常困难,而近似纳什均衡在解决这方面问题具有优势。

本文提出了一种兼顾降低碳排放、提高经济性与提升配电网弹性的交直流混合配电网协同调控方法,文中采用两阶段随机规划方法,第一阶段基

于日前预测信息制定日前调控计划;第二阶段考虑多种运行场景,优化实时调整策略,以实现最小化总期望,达到“经济-低碳-弹性”三重目标在不同条件下的协同优化。基于近似纳什均衡理论方法,综合考虑了不同运行条件下降低碳排、提高经济性与配网弹性的协同优化调控策略。最后,通过多工况下的算例进行仿真,验证文中所提策略的有效性。

## 1 交直流配电网的碳减排与弹性问题描述

交直流配电系统运行期间,本文将运行场景划分为正常运行与极端灾害条件两大类。此外,文中提及的交直流混合配电网传输方式为架空线路,暂不考虑电缆输电的影响。在配电网弹性问题研究中,将弹性分析过程按时间维度划分4个阶段:弹性规划、预防响应、抵御吸收和故障恢复(如图1所示)。本文研究聚焦于抵御吸收的协同调控(图1中黄色部分),重点关注计及多种灵活性资源的协同优化。



图1 混合配电网弹性阶段

Fig. 1 Resilience stage of distribution network

交直流配电网碳减排与弹性存在紧密联系,在电源侧,交直流配电网的碳减排与发电能源类型密切相关<sup>[15]</sup>,提高可再生能源在交直流配电网中的渗透率,是降低碳排放的关键。在电网侧,交直流混合配电网相比传统交流电网具有更低的损耗<sup>[16-17]</sup>。

## 2 面向碳减排和弹性的配电网调控模型

### 2.1 优化调控模型的构建

#### 2.1.1 碳减排的协同调控模型构建

本节建立配电网碳减排调控模型的技术思想为:配电网不配备火力发电,自身不直接产生碳排放,但其从主网购买电量背后对应着发电侧的碳排放;因此,需要在碳交易市场中,为其购入电量所间接导致的碳排放。在该种情况下,本调控策略在满足自身需求下,尽可能减少从主网购买高碳电力,可同时降低碳排放和购电成本,实现碳减排和经济性目的。同时,为考虑新能源出力 and 负荷不确定性

问题,本节提出了二阶段优化调控模型。因此,给出描述配电网碳减排的协同调控优化数学模型如下所示

$$f_1 = \min \left\{ C_{\text{total}}^{\text{DA}} + \sum_{n=1}^N \rho(v_n) C_{\text{total}}^{\text{RT}}(v_n) \right\} \quad (1)$$

$$C_{\text{total}}^{\text{DA}} = \sum_{t=1}^T \left[ \lambda_{\text{buy}}(t) P_{\text{grid}}^{\text{buy}}(t) - \lambda_{\text{sell}}(t) P_{\text{grid}}^{\text{sell}}(t) \right] \Delta t + \lambda_{\text{carbon}} \left( \sum_{t=1}^T \left( e_{\text{grid}}(t) \max(0, P_{\text{grid}}^{\text{buy}}(t) - P_{\text{grid}}^{\text{sell}}(t)) \Delta t \right) - E_{\text{allowance}} \right) \quad (2)$$

$$C_{\text{total}}^{\text{RT}}(v_n) = \sum_{t=1}^T \left[ \lambda_{\text{rt}}(t) \Delta P_{\text{grid}}^{\text{buy}}(v_n, t) - \lambda_{\text{rt}}(t) \Delta P_{\text{grid}}^{\text{sell}}(v_n, t) \right] \Delta t + \lambda_{\text{carbon}} \Delta E_{\text{grid}}(v_n, t) + C_{\text{curt}}(v_n) + C_{\text{shed}}(v_n) \quad (3)$$

式中:  $C_{\text{total}}^{\text{DA}}$  为日前预测表达式;  $C_{\text{total}}^{\text{RT}}$  为实时调整表达式(由于预测偏差导致);  $T$  为调控周期内的总时段数;  $t$  为第  $t$  时段;  $\lambda_{\text{buy}}(t)$  为时段  $t$  的购电电价;  $P_{\text{grid}}^{\text{buy}}(t)$  为时段  $t$  从主网购入的有功功率;  $\lambda_{\text{sell}}(t)$  为时段  $t$  的售电价;  $P_{\text{grid}}^{\text{sell}}(t)$  为时段  $t$  向主网返送的有功功率(该部分主要有配电网中新能源出力过剩产生);  $\Delta t$  为每个时段的时长;  $\lambda_{\text{carbon}}$  为碳减排的交易价格;  $e_{\text{grid}}$  为时段  $t$  主网的边际碳排因子(代表了主网每提供一定电量所对应的平均碳减排水平);  $E_{\text{allowance}}$  为配电网获得的免费碳减排配额;  $\Delta P_{\text{grid}}^{\text{buy}}(t)$  为时段  $t$  实时调整的购买有功功率变化量;  $\Delta P_{\text{grid}}^{\text{sell}}(t)$  为时段  $t$  实时调整的返送有功功率变化量;  $\lambda_{\text{rt}}(t)$  为实时市场电价;  $C_{\text{curt}}(v_n)$  为弃风弃光的惩罚成本;  $C_{\text{shed}}(v_n)$  为削减负荷的惩罚成本;  $v_n$  为系统运行场景;  $N$  为场景数目;  $\rho(v_n)$  为第  $v_n$  种场景的发生概率。

本文采用华东地区某省级电网夏季电价政策的分时电价,如下所示

表1 不同时段电价

Table 1 Electricity prices in different time periods

| 时段          | 购电电价 | 售电电价 |
|-------------|------|------|
| 00:00—08:00 | 0.35 | 0.28 |
| 08:00—15:00 | 0.75 | 0.60 |
| 15:00—17:00 | 0.55 | 0.44 |
| 17:00—20:00 | 0.95 | 0.76 |
| 20:00—22:00 | 0.55 | 0.44 |
| 22:00—24:00 | 0.35 | 0.28 |

### 2.1.2 弹性分析的调控模型

配电网层面以全网弹性尽可能好为目标建立调控模型,并建立网络系统弹性的度量模型。配电网在一定时间( $t_0 \sim t_2$ )内的性能表现,可用图2表示。

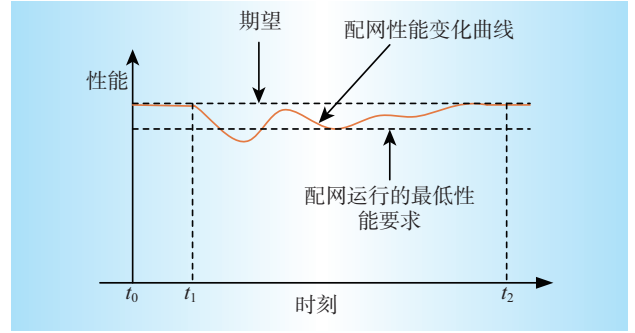


图2 配电网的性能表现

Fig. 2 Performance of distribution network

图2中,配网在  $t_1$  时刻受到扰动,  $t_1 \sim t_2$  为恢复过程,  $t_2$  为恢复到正常状态。  $Q_N(t)$  为配电网系统在时间  $t$  的性能;  $Q'_N(t)$  为配电网系统在时间  $t$  的最低性能要求;  $P_Q(t)$  为配电网系统在时间  $t$  的期望<sup>[18-20]</sup>。本文分析中,对配电网“性能”通过电压偏差、频率、供电可靠性和故障恢复时间4个维度进行评价,并在下文给出详细的评估模型。

配电网系统弹性评估可由下式表示

$$r_N(t) = \frac{\int_{t_1}^{t_2} Q_N(t)^\eta [(Q_N(t) - Q'_N(t)) \geq 0] dt}{\int_{t_1}^{t_2} P_Q(t)^\eta dt} \quad (4)$$

式中:  $[A]$  为艾弗森括号;  $A$  为真时,  $[A] = 1$ , 否则  $[A] = 0$ ;  $\eta$  为参数,  $\eta \in \{0, 1\}$ 。当  $\eta = 0$  时,式(4)如下

$$r_{N0}(t) = \frac{\int_{t_1}^{t_2} [(Q_N(t) - Q'_N(t)) \geq 0] dt}{t_2 - t_1} \quad (5)$$

由式(5)可知,此时从时间维度刻画了配电网系统在一定时间内受到灾害冲击后,性能是否降低到最低要求以下,以及配网系统运行能力恢复至最低性能要求的快慢程度,其值越大表征配网遭受扰动后恢复到运行最低性能的能力越强。

当  $\eta = 1$  时,式(4)中可表示如下

$$r_{N1}(t) = \frac{\int_{t_1}^{t_2} Q_N(t) [(Q_N(t) - Q'_N(t)) \geq 0] dt}{\int_{t_1}^{t_2} P_Q(t) dt} \quad (6)$$

由式(6)可知,此时表征配网系统在运行时间段(系统性能高于最低性能要求)内实际性能与最佳(期望)性能  $P_Q(t)$  的接近程度,即系统在运行时段内实际有效性能累积与最优(期望)性能累积比值。

由以上分析可知,  $r_{N0}(t)$  主要考虑了配网系统满足最低运行要求的累积时间情况,并未考虑系统在最低运行需求能力之上的性能程度。  $r_{N1}(t)$  主要考虑网络系统性能恢复程度,缺乏对运行需求满足时间的反映。因此,结合时间和性能2个维度的弹性指标,根据对运行时段的评估要求,设计配网系统综合弹性评估模型,表示如下

$$f_2 = \alpha r_{N0}(t) + (1 - \alpha) r_{N1}(t) \quad (7)$$

式中： $\alpha$  为参数， $\alpha \in [0, 1]$ 。

由上述推导可知，当侧重于分析配网系统在遭受扰动后能够保持最低需求性能继续运行的能力时，可设置较大的  $\alpha$  值，使综合弹性分析侧重于运行时间弹性。当需要了解配网遭受扰动后，在运行时间内性能恢复程度及累积情况，可设置较小的  $\alpha$  值，表示综合弹性分析侧重于运行期间的性能弹性。

其中，本部分给出配电网性能评估模型  $Q_N(t)$ ，表示如下

$$Q_N(t) = - \left( \sum_{i=1}^q \omega_i S_i \right) \quad (8)$$

$$\omega_i = S_i / \sum_{i=1, q} S_i \quad (9)$$

式中： $Q_N(t)$  为配电网综合评估性能； $\omega_i$  为第  $i$  个指标的权重； $S_1$  为电压偏差； $S_2$  为频率稳定性； $S_3$  为供电可靠性； $S_4$  为故障恢复时间。其中  $S_i$  作归一化处理的计算过程分述如下

电压偏差为  $S_1$ ，表示如下

$$S_1 = \sum_{i \in \Omega_6} |u_i - u_i^e| / u_i^e \quad (10)$$

式中： $u_i$  为  $i$  节点的实际电压； $u_i^e$  为  $i$  节点的额定电压； $\Omega_6$  为关键节点集合。

频率稳定性为  $S_2$ ，表示如下

$$S_2 = |f - f^e| / f^e \quad (11)$$

式中： $f$  为系统运行频率； $f^e$  为系统额定频率。

供电可靠性为  $S_3$ ，表示如下

$$S_3 = \sum \left( \frac{P_{lt}}{P_{\Sigma} t_{\Sigma}} \right) \quad (12)$$

式中： $P_{lt}$  为停电负荷； $P_{\Sigma}$  为网络总负荷； $t_{lt}$  为停电时间； $t_{\Sigma}$  为总运行时间。

故障恢复时间为  $S_4$ ，表示如下

$$S_4 = \sum_{i \in \Omega_5} \rho_i r_i^t / \rho_i r_{i \max}^t \quad (13)$$

式中： $r_i^t$  为系统元件  $i$  发生故障后的恢复时间； $r_{i \max}^t$  为系统元件发生故障后的最大恢复时间； $\Omega_5$  为系统元件的集合； $\rho_i$  为故障恢复的修正参数，设定与故障类型有关。

## 2.2 约束条件

文中采用 DistFlow 潮流模型<sup>[21]</sup>，约束方程如下所述。

(1) 交流支路潮流约束

$$\sum_{i \in \Omega_1} (P_{ij} - I_{ij}^2 R_{ij}) - P_j = \sum_{k \in \Omega_2} P_{jk} \quad (14)$$

$$\sum_{i \in \Omega_1} (Q_{ij} - I_{ij}^2 X_{ij}) - Q_j = \sum_{k \in \Omega_2} Q_{jk} \quad (15)$$

$$I_{ij}^2 = \frac{P_{ij}^2 + Q_{ij}^2}{U_i^2} \quad (16)$$

式中： $P_{ij}$  和  $Q_{ij}$  分别为  $i-j$  支路的有功和无功功率； $P_j$  为注入节点  $j$  的有功功率； $R_{ij}$  和  $X_{ij}$  分别为  $i-j$  支路的电阻和电抗； $I_{ij}$  为支路  $i-j$  的电流； $U_i$  为节点  $i$  的电压； $\Omega_1$  和  $\Omega_2$  分别为交流节点集合。

(2) 直流支路潮流约束

$$\sum_{i \in \Omega_3} (P_{ij} - I_{ij}^2 R_{ij}) - P_j = \sum_{k \in \Omega_4} P_{jk} \quad (17)$$

$$I_{ij}^2 = \frac{P_{ij}^2}{U_i^2} \quad (18)$$

式中： $\Omega_3$ 、 $\Omega_4$  分别为直流节点集合；其他参量如式(9)~式(11)所述。

(3) 节点安全约束

$$U_i^{\min} \leq U_i \leq U_i^{\max} \quad (19)$$

$$(I_{ij})^2 \leq (I_{ij}^{\max})^2 \quad (20)$$

式中： $U_i^{\max}$  和  $U_i^{\min}$  分别为节点  $i$  电压的最大和最小值； $I_{ij}$  为支路  $i-j$  电流； $I_{ij}^{\max}$  为支路  $i-j$  电流最大值。

(4) 新能源发电出力约束

$$0 \leq P_{ri} \leq P_{ri}^{\max} \quad (21)$$

$$\frac{-P_{ri} \sqrt{1 - k_{ri}^2}}{k_{ri}} \leq Q_{ri} \leq \frac{P_{ri} \sqrt{1 - k_{ri}^2}}{k_{ri}} \quad (22)$$

式中： $P_{ri}$  和  $Q_{ri}$  为可再生能源  $i$  的有功和无功出力； $k_{ri}$  为最小功率因数。

(5) 有载调压变压器 (on load tap changer, OLTC) 运行的变比约束

$$n_{Ti}^{\min} \leq n_{Ti} \leq n_{Ti}^{\max} \quad (23)$$

式中： $n_{Ti}$  为第  $i$  台 OLTC 的变比； $n_{Ti}^{\min}$ 、 $n_{Ti}^{\max}$  分别变压器  $i$  可调变比的上、下限。本文未考虑日动作次数限制。

(6) 可调节负荷的功率约束

$$0 \leq P_{li} \leq \delta_i P_{li}^{\max} \quad (24)$$

式中： $P_{li}$  为可调负荷  $i$  的功率； $P_{li}^{\max}$  为可调负荷  $i$  功率的最大值； $\delta_i$  为 0-1 变量，当可调负荷  $i$  切除时  $\delta_i = 0$ ，当可调负荷  $i$  接入时  $\delta_i = 1$ 。

(7) 无功补偿设备的出力约束

$$-Q_{ci}^{\min} \leq Q_{ci} \leq Q_{ci}^{\max} \quad (25)$$

式中： $Q_{ci}$  为无功补偿设备  $i$  的无功出力； $Q_{ci}^{\min}$  和  $Q_{ci}^{\max}$  分别为无功出力最小值和最大值。本文未考虑日投切次数限制。

(8) 储能的运行约束

$$0 \leq P_i^{\text{ch}} \leq \gamma_i^{\text{ch}} P_i^{\text{maxch}} \quad (26)$$

$$0 \leq P_i^{\text{dis}} \leq \gamma_i^{\text{dis}} P_i^{\text{maxdis}} \quad (27)$$

$$\gamma_i^{\text{ch}} + \gamma_i^{\text{dis}} + \gamma_i^{\text{out}} = 1 \quad (28)$$

式中： $\gamma_i^{\text{ch}}$ 、 $\gamma_i^{\text{dis}}$ 、 $\gamma_i^{\text{out}}$  分别为 0-1 变量； $\gamma_i^{\text{ch}}$  为第  $i$  个储能处于充电状态； $\gamma_i^{\text{dis}}$  为放电状态； $\gamma_i^{\text{out}}$  为退出运行

状态;  $P_i^{\text{ch}}$  为第  $i$  个储能的充电功率;  $P_i^{\text{maxch}}$  为充电最大功率;  $P_i^{\text{dis}}$  为第  $i$  个储能的放电功率;  $P_i^{\text{maxdis}}$  为放电最大功率。

### 3 基于近似纳什均衡的协同调控方法分析

当2个或更多个各自有独立的目标函数时,找到一个使双方或多方都无法单方面改进的解,即纳什均衡<sup>[22-24]</sup>。然而,在实际情况下,有时严格纳什均衡可能难以达到,容易变成一个非确定性多项式(nondeterministic polynomial, NP)问题。因此,本文给出了近似纳什均衡的策略,在一些限制约束条件和一定精度下,使目标函数式(1)和式(7)达到最优,完成文中提出的碳减排和弹性最优协同调控。为方便求解,将近似纳什均衡转化为一个最优问题形式,数学模型表示如下

$$\min\{\lambda R_1 + (1 - \lambda)R_2\} \quad (29)$$

$$R_1 = \sup_{x' \in X} [f_1(x, y) - f_1(x', y)] \quad (30)$$

$$R_2 = \sup_{y' \in Y} [f_2(x, y) - f_2(x, y')] \quad (31)$$

式中:  $\lambda$  为权重因子,  $\lambda \in [0, 1]$ , 当  $\lambda = 0.5$  时,则调控配电网时,考虑碳减排和弹性并重;  $X$  为  $f_1$  的调控变量空间;  $Y$  为  $f_2$  的调控变量空间;  $x'$  为  $X$  空间的一组调控变量;  $y'$  为  $Y$  空间的一组调控变量。

由近似纳什均衡模型式(29)一式(31),找到一组控制变量数值,在给定精度下,使得碳减排和网络弹性的调控达到一个平衡。计算流程图如下

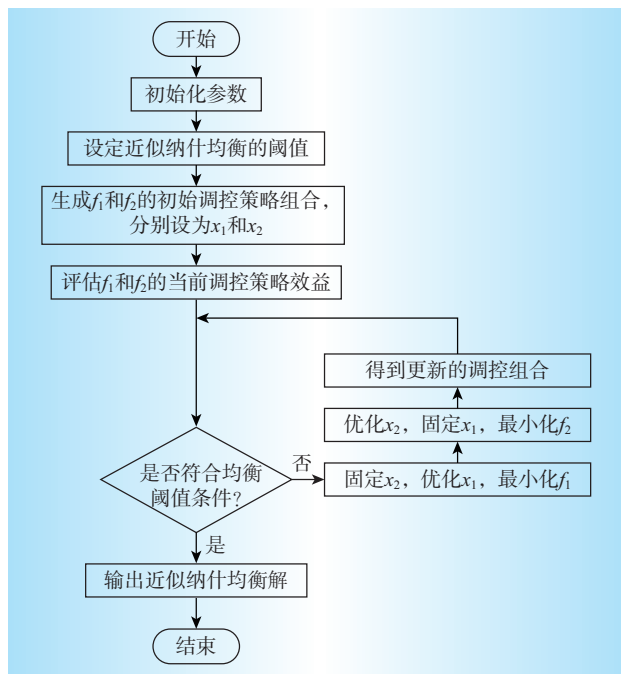


图3 应用近似纳什均衡计算流程

Fig. 3 Calculation flow of approximate nashequilibrium

本文计算中采用交替优化算法,首先将2个冲突目标分别建模为2个函数,随机初始化各自策略后进入交替优化循环—每轮迭代中,先固定一方优化决策,再固定新策略优化另一方决策,如此反复直至连续迭代目标函数变化量均小于预设阈值。这种策略交互过程最终收敛于近似纳什均衡状态,此时任一方都无法通过单方面改变策略获得显著收益提升,从而实现了冲突目标之间的最佳权衡,具体过程为:  $x_1$  和  $x_2$  分别为  $f_1$  和  $f_2$  目标函数的一组调控变量值,首先初始化策略组合和收敛阈值,随后交替固定一个决策变量优化另一变量(如固定  $x_2$  优化  $x_1$  的目标函数  $f_1$ ,再固定  $x_1$  优化  $x_2$  的目标函数  $f_2$ ),通过迭代更新策略,直至两次迭代的目标函数变化量均小于阈值  $\varepsilon$ ,此时输出满足  $\varepsilon$  精度的均衡解。最后验证解的 Pareto 前沿最优性,确保没有其他解能在不损害任一目标的情况下进一步优化。

### 4 算例数值分析

本文以改进的 IEEE33 节点系统和雄安新区某园区为例,对交直流混合配电网进行协调调控,验证本文所提研究方法的有效性和优势。

#### 4.1 改进 IEEE33 节点系统算例

本节在 64 位 3.30 GHz CPU 和 8 GB RAM 的计算机上依托 MATLAB 2020a 软件,建立改进的 IEEE33 节点交直流混合配电系统,验证本文所提运行调控策略的有效性。改进的 IEEE33 节点系统接线示意图如图 4 所示,表 2 给出了接入系统的光伏发电(photovoltaic power generation, PV)、储能装置(battery energy storage system, BESS)、无功补偿装置(capacitor bank, CB)和有载调压变压器(OLTC)的参数设置<sup>[10]</sup>。

表2 接入装置参数

Table 2 Parameters of devices

| 装置   | 参数                                     |
|------|----------------------------------------|
| PV   | 容量 1 000 kVA                           |
| BESS | 容量 1.2 MW, 充电率 0.5, 荷电状态 5% ~ 95%      |
| CB   | 单组补偿功率 50 kvar, 最大补偿组数 4               |
| OLTC | 10 档位, 变比为 0.95 ~ 1.05, 分接头每一档变化值 0.01 |

交直流配电系统直流侧基准电压为  $\pm 10$  kV, 交流侧基准电压为 12.66 kV, 基准容量为 10 MVA。关口有功功率范围为 0~2 000 kW, 无功功率范围为 0~2 000 kvar, 支路电流幅值上限为 0.50 p.u., 节点电压幅值为 0.95~1.05 p.u.。

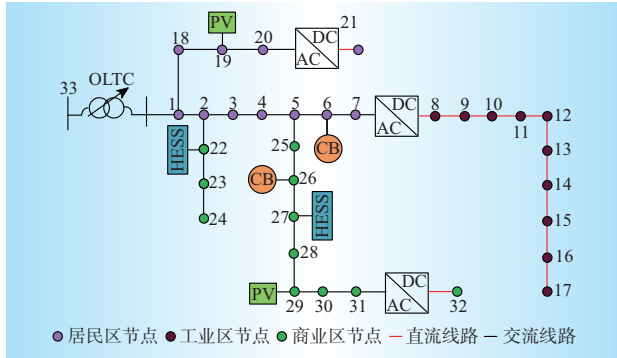


图4 改进的IEEE33节点配电网

Fig. 4 Improved IEEE33-node distribution network

图4中, CB为无功补偿装置, PV为光伏发电, OLTC为有载调压变压器, BESS为储能装置。

为验证文中所提出综合调控策略的效果, 设计4种场景进行比较分析, 计算中参数 $\alpha$ 取为0.5。

场景1: 综合考虑碳减排和弹性为目标(式(29)所示), 进行网络系统调控;

场景2: 仅以弹性指标为目标函数(式(7)所示), 进行网络系统调控;

场景3: 以已有文献方法最优为目标函数<sup>[21]</sup>, 以经济性为目标进行网络系统调控;

场景4: 以碳减排和经济性为双重目标函数(式(1)所示), 进行网络系统调控。

在网络系统工况相同的背景下, 设置4种不同场景, 量化评价指标的计算结果如表3所示。通过计算求得Pareto前沿曲线如图5所示。

表3 量化评价指标的计算结果

Table 3 Calculation results of quantitative evaluation indicators

| 场景  | 费用/万元 | 弹性评估   | 新能源消纳率/% | 电压偏差率/% |
|-----|-------|--------|----------|---------|
| 场景1 | 3.05  | -16.20 | 93       | 0.24    |
| 场景2 | 3.47  | -21.30 | 61       | 0.26    |
| 场景3 | 3.11  | -14.80 | 86       | 0.42    |
| 场景4 | 2.34  | -6.29  | 95       | 6.10    |

图5中横坐标“弹性”是由式(7)和式(28)计算而得, 是度量网络系统弹性的一个标量, 没有单位。

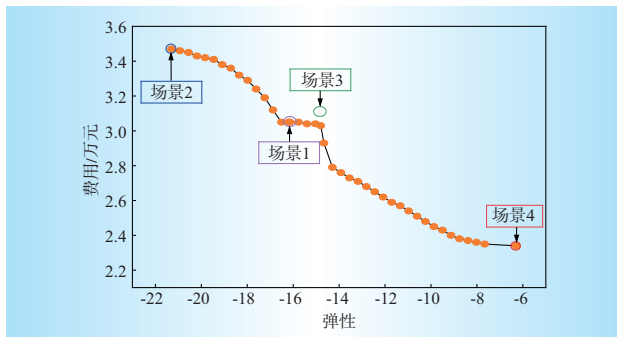


图5 多场景的Pareto前沿分布

Fig. 5 Pareto frontier distribution for multiple scenarios

图5表示了不同场景下的运行结果及在Pareto前沿位置。场景1是综合考虑碳减排和弹性均衡后的最佳结果。该种调控运行结果, 使得可再生能源消纳达到93%, 电网弹性大幅提升, 停电率仅为0.19%, 电压偏差也仅为0.24%。场景2以弹性最优为目标函数, 该种调控, 虽然配网弹性得到很好提升, 停电率达到0.15%, 电压偏差为0.26%, 频率变化仅为0.06%; 但碳减排却并不理想, 可再生能源消纳仅达到61%, 弃风弃光现象严重。场景4以碳减排和经济性为目标函数, 可再生能源消纳率达到95%, 但配电网弹性并不好, 电压偏差达到6.10%, 频率变化3%, 不利于应对可能突发的极端灾害情况。

场景3采用加权法解决多目标问题, 虽然也兼顾了配电网碳减排和弹性的问题, 可再生能源消纳达到86%, 电压偏差也仅为0.42%。但结果显示, 场景3的解不在Pareto前沿上, 表明此时碳减排和弹性之间不存在非支配关系, 固定其中一个目标值、改变另一个目标值仍可获得更大的综合收益, 所以, 该解不是Pareto最优解。

通过对4种调控方案的对比分析可知, 在交直流混合配电网优化中, 单一目标导向(纯碳减排最小化或纯弹性最大化)的调控策略存在明显局限性。实证研究表明, 必须建立多目标协同优化机制以实现系统综合性能的提升。传统加权求和法存在2个本质缺陷: ① 权重分配的主观性会扭曲优化方向; ② 当目标函数存在量级差异时, 低量级目标的优化效果将被抑制。相比之下, 基于近似纳什均衡的博弈论方法通过虚拟决策者的非合作博弈过程, 天然解决了量纲归一化问题, 其均衡解具有严格Pareto最优性, 这已被数学证明<sup>[24]</sup>。

#### 4.2 雄安新区某园区交直流配电系统算例

以雄安新区某园区10 kV交直流混合配电网为例, 设置配电网受到极端灾害, 某些线路发生故障, 应用本文所提调控策略进行计算分析, 并与已有文献对比<sup>[25-26]</sup>。园区配电网系统结构, 如图6所示。

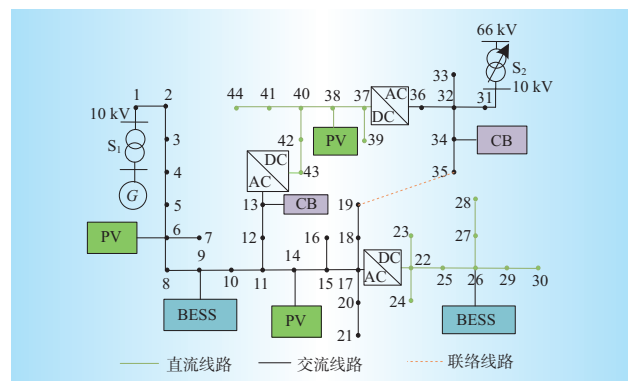


图6 园区交直流混合配电网络结构

Fig. 6 Structure of AC/DC hybrid distribution network

园区有44个节点,2个变电站为 $S_1$ 、 $S_2$ ,分别接于节点1和31处,配电网各线路阻抗参数均为 $(0.1+j0.102)\Omega/\text{km}$ 。交直流接口:换流站(AC/DC)容量为5 MVA,将10 kV交流转换为 $\pm 10$  kV直流。基准功率为10 MVA,系统总峰值负荷约为16 MW。

为验证本文调控策略效能,选择在节点18–34,22–39之间设联络开关,其基本参数如表4所示。

表4 联络开关基本参数

Table 4 Basic parameters of contact switch

| 联络线路  | 导线类型                    | 线路长度/km | 阻抗/ $(\Omega\cdot\text{km}^{-1})$ |
|-------|-------------------------|---------|-----------------------------------|
| 18–34 | YJV22–8.7/15<br>300–120 | 0.020   | 0.060 2                           |
| 22–39 | YJV22–8.7/15<br>300–120 | 0.013   | 0.060 2                           |

园区接入光伏发电(PV)、无功补偿装置(CB)等,接入装置参数如表5所示。

表5 接入装置参数

Table 5 Parameters of devices

| 装置      | 参数                           |
|---------|------------------------------|
| 节点6 PV  | 容量400 kW                     |
| 节点14 PV | 容量300 kW                     |
| 节点38 PV | 容量300 kW                     |
| CB      | 单组补偿功率40 kvar<br>最大补偿组数2     |
| BESS    | 容量1 MW,充电率100%<br>荷电状态5%~95% |

算例故障设置为:线路14–15,线路22–26发生永久性断线故障。采用如下调控策略。

策略1:以经济性为目标进行调控<sup>[25]</sup>;

策略2:以本文所提的综合优化调控策略;

策略3:考虑多目标优化的配网调控策略<sup>[26]</sup>。

基于以上3种调控策略进行计算分析,得到不同调控方法下配电网负荷恢复结果,如图7所示。

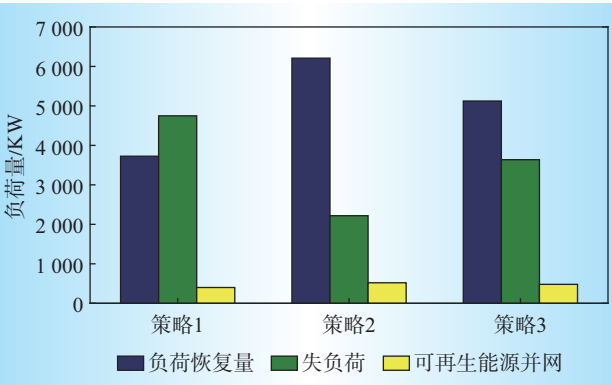


图7 不同策略的负荷恢复情况

Fig. 7 Load recovery situation of different strategies

计算结果显示,采用经济性导向策略1时,系统

负荷恢复量为3 726 kW,供电恢复率为43.80%,可再生能源并网率为69%。主要源于以下限制:通过闭合固定联络线路18–34和22–39,虽能恢复线路14–15下游区域及支路22–26下游节点负荷,但由于传统联络线路拓扑结构固化、运行灵活性不足,导致系统在故障恢复过程中无法有效覆盖故障线路中间区段节点的负荷需求。这种仅以经济性的运行约束,限制了园区配电网在调控过程中整体负荷恢复能力,应对极端灾害的弹性能力不足。

采用策略2,即园区交直流配电网灾时故障抵御吸收策略,负荷恢复量达到6 210 kW,供电恢复率为73%,负荷恢复量提升明显,可再生能源并网率为89%,提升园区负荷恢复价值期望。这是因为策略2通过可调负荷需求响应政策,有效削减了园区配电网各节点中所接等级较低的负荷,园区配电网在恢复过程中优先考虑系统重要负荷,使园区可以恢复更多高等级负荷,提升园区整体负荷恢复期望,碳减排优势明显。

采用策略3,负荷恢复量达到5 214 kW,供电恢复率为61.3%,可再生能源并网率达到83%,负荷恢复提升较大,优于策略1,但与策略2相比,在适应性和有效性方面尚存一定差距。

不同策略下,配电网调控结果可以看出:在配电网同时发生多处故障后,采用策略1,仅考虑经济性而忽视应对灾害影响的弹性能力,对配网负荷恢复的负面影响较大;采用策略2,网络系统的负荷恢复价值期望大幅度提升,应对极端灾害的情况表现出明显优势,同时,可再生能源并网比例也较高,碳减排控制较好。

5 结束语

为充分发挥交直流混合配电网调控灵活的优势,基于近似纳什均衡方法,本文构建碳减排和弹性的协同调控模型,并在不同节点系统的交直流混合配电网进行了分析和验证,得到主要结论如下

(1) 改进IEEE33节点交直流混合配电系统的计算结果表明,采用近似纳什均衡方法求解多目标优化问题,能够保证解集的Pareto最优性,其均衡解位于Pareto前沿上。相较于传统的加权求和法可能陷入局部最优解的情况,本文所提方法通过博弈论框架下的策略互动机制,实现了各目标函数的协同优化,从而获得全局意义上的综合效益最大化。

(2) 雄安新区某园区配电网算例计算结果表明,针对发生的极端灾害事故,利用配电网弹性和

经济性提升、碳减排的优化协同策略,能够显著提升配网系统抵御极端灾害的能力,有效实现碳减排,进一步验证了文中所提策略方法的有效性。

本文建立的优化调控策略中,没有考虑更多柔性设备的互联耦合问题,在后续工作中,将对这些问题进行综合研究。D

## 参考文献:

- [1] 彭静,王军,亓富军,等. “双碳”目标下配电网多阶段扩展规划[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(7): 153-161.  
PENG Jing, WANG Jun, QI Fujun, et al. Multi-stage expansion planning of a distribution network with double-carbon policy[J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(7): 153-161.
- [2] 王一,马子明,谭跃凯,等. 广东日前电力市场方案设计与市场仿真[J]. 电力需求侧管理, 2018, 20(1): 10-14.  
WANG Yi, MA Ziming, TAN Yuekai, et al. Day-ahead power market design and market simulation in Guangdong province [J]. Power Demand Side Management, 2018, 20(1): 10-14.
- [3] 陈昊,刘怀宇,姚凯,等. 采用自补偿复合电流判据的变电站长段动力电缆漏电监测方法[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(12): 172-179.  
CHEN Hao, LIU Huaiyu, YAO Kai, et al. Leakage current monitoring method for a long power cable in a substation based on a combined current criterion with self-compensation[J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(12): 172-179.
- [4] 周磊,吴辉,嵇文路,等. 微电网脆弱性预评估方法[J]. 电力需求侧管理, 2018, 20(1): 20-24.  
ZHOU Lei, WU Hui, JI Wenlu, et al. Vulnerability pre-assessment method for microgrid [J]. Power Demand Side Management, 2018, 20(1): 20-24.
- [5] 童潇宁,王月强,仇张权,等. 基于数据驱动多面体集合的交直流混合配电网鲁棒调度方法[J]. 电力系统保护与控制, 2024, 52(3): 38-50.  
TONG Xiaoning, WANG Yueqiang, QIU Zhangquan, et al. Robust scheduling method for AC/DC hybrid distribution networks based on a data-driven polyhedral set[J]. Power System Protection and Control, 2024, 52(3): 38-50.
- [6] 舒印彪,张正陵,汤涌,等. 新型电力系统构建的若干基本问题[J]. 中国电机工程学报, 2024, 44(21): 8 327-8 341.  
SHU Yinbiao, ZHANG Zhengling, TANG Yong, et al. Some basic problems of new power system construction [J]. Chinese Journal of Electrical Engineering, 2024, 44(21): 8 327-8 341.
- [7] 吴毓奋,余立志,符史坚,等. 考虑故障恢复策略的有源配电网可靠性评估[J]. 电力需求侧管理, 2025, 27(2): 99-105.  
WU Yufen, YU Lizhi, FU Shijian, et al. Reliability assessment of active distribution networks considering fault recovery strategies [J]. Power Demand Side Management, 2025, 27(2): 99-105.
- [8] 刘洪,李吉峰,葛少云,等. 基于多主体博弈与强化学习的并网型综合能源微网协调调度[J]. 电力系统自动化, 2019, 43(1): 40-48.  
LIU Hong, LI Jifeng, GE Shaoyun, et al. Coordinated scheduling of grid-connected integrated energy microgrid based on multi-agent game and reinforcement learning [J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(1): 40-48.
- [9] 张璐,黄睿,王照琪,等. 考虑恢复力与经济性均衡的配电网移动储能优化配置策略[J]. 电力系统自动化, 2020, 44(21): 23-31.  
ZHANG Lu, HUANG Rui, WANG Zhaoqi, et al. Optimal configuration strategy of mobile energy storage in distribution network considering balance between resilience and economy [J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(21): 23-31.
- [10] 廖小兵,周自强,乐健,等. 考虑电池储能老化和需求侧响应的交直流混合配电网动态重构方法[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(14): 43-54.  
LIAO Xiaobing, ZHOU Ziqiang, LE Jian, et al. Dynamic reconfiguration of an AC/DC hybrid distribution network considering battery energy storage aging and demand response [J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(14): 43-54.
- [11] 张儒峰,宋宜庭,宁若汐. 考虑储能的交直流混合配电网无功电压分布式优化调控[J]. 全球能源互联网, 2025, 8(1): 24-35.  
ZHANG Rufeng, SONG Yiting, NING Ruoxi. Distributed optimal control method of reactive power and voltage in ac/dc hybrid distribution network considering energy storage system [J]. Journal of Global Energy Interconnection, 2025, 8(1): 24-35.
- [12] 张忠会,雷大勇,蒋昌辉,等. 基于二阶锥规划和NNC法的交直流混合配电网双层规划模型及其求解方法[J]. 中国电机工程学报, 2023, 43(1): 70-85.  
ZHANG Zhonghui, LEI Dayong, JIANG Changhui, et al. Bi-level planning model and its solution method of ac/dc hybrid distribution network based on second-order cone programming and nnc method [J]. Proceedings of the CSEE, 2023, 43(1): 70-85.
- [13] 郭雪丽,郑峰,王爽. 考虑越限风险的配电网移动式储能优化调度技术分析[J]. 电力需求侧管理, 2024,

- 26(4):37-42.
- GUO Xueli, ZHENG Feng, WANG Shuang. Analysis of mobile energy storage optimal scheduling technology in distribution network considering violation risk [J]. Power Demand Side Management, 2024, 26(4):37-42.
- [14] 勇蔚柯,李扬,曹阳. 基于需求响应的配电网韧性提升技术研究[J]. 电力需求侧管理, 2022, 24(2):20-26.
- YONG Weike, LI Yang, CAO Yang. Research on improvement technology of distribution network resilience based on demand response [J]. Power Demand Side Management, 2022, 24(2):20-26.
- [15] 黄大为,王孝泉,于娜,等. 计及光伏出力不确定性的配电网混合时间尺度无功/电压控制策略[J]. 电工技术学报, 2022, 37(17):4 377-4 389.
- HUANG Dawei, WANG Xiaoquan, YU Na, et al. Hybrid timescale voltage/var control in distribution network considering pv power uncertainty [J]. Transactions on China Electrotechnical Society, 2022, 37(17):4 377-4 389.
- [16] QI C, WANG K Y, FU Y, et al. A decentralized optimal operation of AC/DC hybrid distribution grids [J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2018, 9(6):6 095-6 105.
- [17] 张世旭,苗世洪,杨炜晨,等. 基于自适应步长 ADMM 的配电网分布式鲁棒优化调度策略[J]. 高电压技术, 2021, 47(1):81-92.
- ZHANG Shixu, MIAO Shihong, YANG Weichen, et al. Distributed robust optimal dispatch for active distribution networks based on alternative direction method of multipliers with dynamic step size [J]. High Voltage Engineering, 2021, 47(1):81-92.
- [18] OUYANG M, WANG Z. Resilience assessment of interdependent infrastructure systems: with a focus on joint restoration modeling and analysis [J]. Reliability Engineering & Systems Safety, 2015, 141:74-82.
- [19] 刘涛,白光晗,陶俊勇,等. 面向任务的复杂系统韧性评估方法[J]. 系统工程与电子技术, 2021, 43(4): 1 003-1 011.
- LIU Tao, BAI Guanghan, TAO Junyong, et al. Mission-oriented resilience evaluation method for complex system [J]. Systems Engineering and Electronics, 2021, 43(4): 1 003-1 011.
- [20] 高红均,刘俊勇,沈晓东,等. 主动配电网最优潮流研究及其应用实例[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(6):1 634-1 644.
- GAO Hongjun, LIU Junyong, SHEN Xiaodong, et al. Optimal power flow research in active distribution network and its application examples [J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(6):1 634-1 644.
- [21] 王守相,陈思佳,谢颂果. 考虑安全约束的交直流配电网储能与换流站协调经济调度[J]. 电力系统自动化, 2017, 41(11):85-91.
- WANG Shouxiang, CHEN Sijia, XIE Songguo. Security-constrained coordinated economic dispatch of energy storage systems and converter stations for AC/DC distribution networks [J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(11):85-91.
- [22] YU X H, ZHANG Q. Fuzzy nash equilibrium of fuzzy n-person non-cooperative game [J]. Journal of Systems Engineering and Electronics, 2010, 21(1):47-56.
- [23] HESAMZADEH M R, BIGGAR D R. Computation of extremal-Nash equilibria in a single-stage MILP [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2012, 27(3):1 706-1 707.
- [24] FRIHAUF P, KRSTIC M, BASAR T. Nash equilibrium seeking in noncooperative games [J]. IEEE Trans on Automatic Control, 2012, 57(5):1 192-1 207.
- [25] 孟令卓超,杨锡运,赵泽宇. 考虑光-荷不确定性和旋转备用约束的主动配电网经济优化调度策略[J]. 电力建设, 2022, 43(11):63-72.
- MENG Lingzhuochao, YANG Xiyun, ZHAO Zeyu. Economic optimal scheduling strategy for active distribution network considering light load uncertainty and rotation reserve constraint [J]. Electric Power Construction, 2022, 43(11):63-72.
- [26] LI L, WANG J, ZHONG X Y, et al. Combined multi-objective optimization and agent-based modeling for a 100% renewable island energy system considering power-to-gas technology and extreme weather conditions [J]. Applied Energy, 2022, 308:118 376.

#### 作者简介:

洪福斌(1986),男,硕士,中级工程师,全国信息技术标准化技术委员会信息技术设备互连分技术委员会委员,研究方向为综合能源系统,新能源并网,双碳优化;

马兆兴(1982),男,通信作者,博士,硕士生导师,研究方向为新型电力系统分析、运行,综合能源系统。

(责任编辑 方德康)

## 广告索引

国网(江苏)电力需求侧管理指导中心有限公司..... (封底)