

阶梯式碳交易机制下基于网络重构的交直流混合配电网优化运行

石松浩, 邹阳, 姚雨佳, 黄煜, 方梦泓, 金涛

(福州大学电气工程与自动化学院, 福州 350108)

摘要: 针对源荷波动性造成交直流混合配电网节点电压失稳、风光损失率高和系统运维成本高等问题, 提出一种计及网络重构与需求响应的交直流混合配电网低碳优化运行方法。首先, 建立面向交直流混合配电网的阶梯式碳交易模型。其次, 以系统经济性和低碳性为优化目标, 考虑网络重构、需求响应、电容器投切、分布式电源接入和储能充放电等多种约束, 建立交直流混合配电网低碳优化运行模型。接着, 通过引入中间变量和二阶锥松弛方法将非凸的配电网优化模型转化为混合整数凸规划模型并进行求解。最后, 通过改进的 IEEE33 节点交直流混合配电网系统对所提方法进行仿真分析, 结果表明所提方法能够显著减少系统运行产生的碳排放量和风光损失率, 提升系统电压稳定性和调度经济性。

关键词: 阶梯式碳交易; 网络重构; 需求响应; 交直流混合配电网; 可再生能源消纳

Optimized Operation of AC/DC Hybrid Distribution Network Based on Network Reconfiguration Under Stepped Carbon Trading Mechanism

SHI Songhao, ZOU Yang, YAO Yujia, HUANG Yu, FANG Menghong, JIN Tao

(College of Electrical Engineering and Automation, Fuzhou University, Fuzhou 350108, China)

Abstract: Aiming at the problems of AC/DC hybrid distribution network node voltage instability, high rate of abandoned wind and photovoltaic power and high system operation and maintenance cost caused by source-load volatility, a low-carbon optimization operation method of AC/DC hybrid distribution network taking into account network reconfiguration and demand response is proposed. Firstly, a stepped carbon trading model for AC/DC hybrid distribution networks is established. Secondly, a low-carbon optimization operation model for AC/DC hybrid distribution networks is developed with the optimization objectives of system economy and low-carbon, taking into account the constraints of network reconfiguration, demand response, capacitor switching, access to distributed power sources, and charging/discharging of energy storage. Then, the nonconvex distribution network optimization model is transformed into a mixed-integer convex planning model and solved by introducing intermediate variables and a second-order cone relaxation method. Finally, the proposed method is simulated and analyzed by the improved IEEE 33-node AC/DC hybrid distribution system, and the results show that the proposed method can significantly reduce the carbon emissions and the rate of wind and photovoltaic power abandonment generated by the system operation, and improve the system voltage stability and dispatch economy.

Key words: stepped carbon trading; network reconfiguration; demand response; hybrid AC/DC distribution network; renewable energy consumption

0 引言

在构建新型电力系统的背景下,分布式可再生能源和电动汽车等直流设备开始大规模接入配电网,直流配电技术得到了快速发展,使得交直流混合配电网成为未来主动配电网的重要实现形式之一^[1-4]。由于光伏(photovoltaic, PV)和风机(wind turbine, WT)等可再生能源出力具有随机性和不确定性,大规模并网将导致交直流混合配电网出现节点电压失稳、线路网损增大、对电力用户供电不足、电力设备绝缘受损等一系列问题^[5]。并且配电网中用户侧负荷持续增长,其中高峰负荷增加尤为明显,严重影响了配电网运行的安全性和可靠性^[6]。同时随着“双碳”目标的推进配网侧面临着新能源消纳和降低碳排放的双重压力。因此,针对源荷波动性下交直流混合配电网低碳优化运行的研究具有重要意义。

网络重构技术和需求响应机制是保证配电网经济安全运行常用的方法。前者通过改变配电网的拓扑结构,达到降低网损、改善电压分布、提升系统可靠性与经济性的目的^[7-8]。后者是电力系统配网侧和用户侧交互的重要手段,通过设立分时电价引导用户改善用电习惯,从而削减负荷峰谷差,保证配电网的稳定安全运行。文献[9]提出一种有源配电网优化方法,通过对网络拓扑进行重构,提升光伏消纳量和降低负荷波动。文献[10]构建了计及网络重构约束的配电网分布鲁棒优化调度模型,在风光出力不确定性的背景下,提升清洁能源消纳率与配网主体盈利。文献[11]以配电网负荷峰谷差为优化目标,提出了基于马尔可夫链的网络重构方法,旨在提升配电网经济性与可靠性。文献[12]在配电网优化模型中引入了需求响应机制,有效地提升了负荷侧的资源利用率,缓解了系统供电压力。文献[13]针对用户侧用电特性,构建了基于价格弹性系数矩阵的需求响应模型,在降低峰谷差的同时,提升配电网经济性。上述文献针对交流配电网优化进行研究,单一的从网络重构或需求响应角度促进配电网安全经济运行,未考虑到两者协同作用对配电网优化运行的影响。并且与传统交流配电网相比,交直流配电网的优化调度模型更为复杂。不仅要考虑交流配电网的运行特性,还需对直流配电网以及VSC换流站进行精细建模,以及处理交、直流区域

之间的能量交换问题。

碳交易机制是实现碳达峰目标与碳中和愿景的有效措施之一^[14-16],主要分为传统型和阶梯型两类。文献[17]探讨了碳交易机制对多微能网的降碳效果并结合需求侧响应提出了多微能网络协同调度策略。文献[18]将阶梯式碳交易机制引入到微电网系统中,对比了两种碳交易机制的碳排放优化效果并分析了对微电网经济运行的影响。文献[19]以储能投资成本和综合能源系统运行的碳排放成本最小为目标进行储能配置,旨在实现综合能源系统运行的经济性和低碳性。目前在涉及碳交易的相关文献中大多以综合能源系统和微电网为背景,鲜有将交直流混合配电网作为研究对象,构造适用于交直流混合配电网的阶梯式碳交易模型。

综上所述,本文提出一种计及网络重构与需求响应的交直流混合配电网低碳优化运行方法。首先,建立面向交直流混合配电网的阶梯式碳交易模型;其次,以系统经济性和低碳性为优化目标,考虑网络重构、需求响应、电容器投切、分布式电源接入、储能系统(energy storage system, ESS)充放电和电压源型换流站(voltage source converter, VSC)运行等多种约束,建立交直流混合配电网低碳优化运行模型;接着,通过引入中间变量和二阶锥松弛方法将非凸的配电网优化模型转化为混合整数凸规划模型并进行求解;最后,通过修改后的IEEE33节点交直流混合配电网系统进行仿真,验证所提方法的有效性与可靠性。

1 阶梯式碳交易模型

1.1 碳排放配额

交直流混合配电网系统在运行过程中会造成碳排放,碳监管部门赋予系统中的各个排放主体一定的额度。若实际排放量大于给定配额,企业则需要通过碳交易市场购买碳排放配额,反之,企业可以通过碳交易市场售卖余下的碳排放配额。由于配电网系统中的碳排放只来源于交流子网向上级电网购电和微型燃气轮机(micro gas turbine, MT)运行,而直流子网在运行中不产生碳排放,因此碳排放配额按照交直流混合配电网系统的全部负荷进行确定^[20]。本文所用配额方法为无偿配额^[21]且默认向上级电网购电来源于燃煤机组发电。

$$E_{np} = \sum_{t \in T} \mu_{load} P_t^{load} \quad (1)$$

式中: E_{np} 为系统碳排放配额; T 为时间段数量; μ_{load} 为单位负荷的碳排放额度; P_t^{load} 为系统负荷功率。

1.2 阶梯型碳交易成本

阶梯型碳交易模型通过需求碳排放量制定了阶梯型的定价区间, 使实际碳排放量超出既定配额较多的生产商花费更多的资金来购买碳交易配额, 从价格方面给生产商压力, 以达到促使生产商减少碳排放^[22]。交直流混合配电网系统在运行过程中实际碳排放量 E_{act} 及参与碳交易的碳排放份额 E_{CO_2} 为:

$$\begin{cases} E_{act} = \sum_{t \in T} \gamma_{th} P_{i,t}^{th} + \sum_{t \in T} \gamma_{sub} P_{i,t}^{sub} \\ E_{CO_2} = E_{act} - E_{np} \end{cases} \quad (2)$$

式中: γ_{th} 为燃气轮机单位电功率的碳排放因子; γ_{sub} 为向上级电网单位购电功率的碳排放因子; $P_{i,t}^{th}$ 和 $P_{i,t}^{sub}$ 分别为燃气轮机发电功率和向上级电网购电功率。

引入的阶梯型碳交易成本 f_{CO_2} 为:

$$f_{CO_2} = \begin{cases} \alpha E_{CO_2}, E_{CO_2} \leq d \\ \alpha(1 + \beta)(E_{CO_2} - d) + \alpha d, d < E_{CO_2} \leq 2d \\ \alpha(1 + 2\beta)(E_{CO_2} - 2d) + \alpha(2 + \beta)d, 2d < E_{CO_2} \leq 3d \\ \alpha(1 + 3\beta)(E_{CO_2} - 3d) + \alpha(3 + 3\beta)d, E_{CO_2} \geq 3d \end{cases} \quad (3)$$

式中: α 为碳交易基本价格; β 为价格增长比例; d 为阶梯长度。

2 交直流混合配电网优化模型

交直流混合配电网系统分为交流子系统和直流子系统, 包含燃气轮机机组、风力发电机组、光伏发电机组、储能装置及实现交直流电网互联的换流站。本文提出的计及网络重构与需求响应的交直流混合配电网低碳优化运行模型旨在通过合理制定系统调度策略提升系统运行的经济性与低碳性。

2.1 目标函数

$$\min F = f_{sub} + f_{gen} + f_{loss} + f_{CO_2} \quad (4)$$

式中: F 为系统综合运行成本; f_{sub} 为向上级电网单位购电成本; f_{gen} 为分布式电源发电成本; f_{loss} 为网络损耗成本。

1) 上级电网购电成本

$$f_{sub} = \sum_{t \in T} \Delta t \sum_{i \in \Omega^{sub}} c_{sub} P_{i,t}^{sub} \quad (5)$$

式中: Ω^{sub} 为向上级电网购电节点集合; c_{sub} 为购电单价; $P_{i,t}^{sub}$ 为在 t 时段 i 节点向上级电网的购电功率; Δt 为单位时段。

2) 分布式电源发电成本

$$f_{gen} = f_{th} + f_{pv} + f_{wind} + f_{ess} \quad (6)$$

$$\begin{cases} f_{th} = \sum_{t \in T} \Delta t \sum_{i \in \Omega^{th}} c_{th} P_{i,t}^{th} \\ f_{pv} = \sum_{t \in T} \Delta t \sum_{i \in \Omega^{pv}} c_{pv} P_{i,t}^{pv} \\ f_{wind} = \sum_{t \in T} \Delta t \sum_{i \in \Omega^{wind}} c_{wind} P_{i,t}^{wind} \\ f_{ess} = \sum_{t \in T} \Delta t \sum_{i \in \Omega^{ess}} c_{ess} (\eta_{ch} P_{i,t}^{ch} + P_{i,t}^{dis} / \eta_{dis}) \end{cases} \quad (7)$$

式中: f_{th} 、 f_{pv} 、 f_{wind} 和 f_{ess} 分别为燃气轮机、光伏、风机和储能装置运行成本; Ω^{th} 、 Ω^{pv} 、 Ω^{wind} 和 Ω^{ess} 分别为燃气轮机、光伏电站、风力机组和储能装置的接入节点集合; c_{th} 、 c_{pv} 、 c_{wind} 和 c_{ess} 分别为燃气轮机、光伏电站、风力机组和储能装置发电成本系数; $P_{i,t}^{th}$ 为在 t 时段 i 节点燃气轮机发电功率; $P_{i,t}^{pv}$ 和 $P_{i,t}^{wind}$ 分别为 t 时段 i 节点光伏和风机的发电功率; $P_{i,t}^{ch}$ 、 $P_{i,t}^{dis}$ 分别为储能系统充放电功率; η_{ch} 、 η_{dis} 分别为储能充放电效率。

3) 网络损耗成本

$$f_{loss} = \sum_{t \in T} \Delta t \left(\sum_{h_i \in \Omega^{ac}} \left(R_{h_i}^{ac} \cdot (I_{h_i,t}^{ac})^2 \right) + \sum_{h_i \in \Omega^{dc}} \left(R_{h_i}^{dc} \cdot (I_{h_i,t}^{dc})^2 \right) \right) \quad (8)$$

式中: Ω^{ac} 和 Ω^{dc} 分别为交流区域和直流区域节点集合; $I_{h_i,t}^{ac}$ 为交流区域支路 h_i 在 t 时刻的电流; $R_{h_i}^{ac}$ 为交流区域支路 h_i 的电阻; $I_{h_i,t}^{dc}$ 为直流区域支路 h_i 在 t 时刻的电流; $R_{h_i}^{dc}$ 为直流区域支路 h_i 的电阻。

2.2 约束条件

1) 潮流约束

(1) 交流子网的潮流约束为:

$$\begin{cases} \sum_{j \in s(i)} P_{ij,t}^{ac} = \sum_{h \in \omega(i)} \left(P_{h,t}^{ac} - R_{h_i}^{ac} \cdot (I_{h_i,t}^{ac})^2 \right) + P_{i,t}^{ac} \\ \sum_{j \in s(i)} Q_{ij,t}^{ac} = \sum_{h \in \omega(i)} \left(Q_{h,t}^{ac} - X_{h_i}^{ac} \cdot (I_{h_i,t}^{ac})^2 \right) + Q_{i,t}^{ac} \end{cases} \quad (9)$$

$$\begin{cases} U_{i,t}^{ac} = U_{h,t}^{ac} - 2 \left(P_{h,t}^{ac} R_{h_i}^{ac} + Q_{h,t}^{ac} X_{h_i}^{ac} \right) + \\ \quad (I_{h_i,t}^{ac})^2 \left((R_{h_i}^{ac})^2 + (X_{h_i}^{ac})^2 \right) \\ (I_{h_i,t}^{ac} U_{i,t}^{ac})^2 = \left((P_{h_i,t}^{ac})^2 + (Q_{h_i,t}^{ac})^2 \right) \end{cases} \quad (10)$$

式中: $\omega(i)$ 为 i 节点的父节点集合; $s(i)$ 为以 i 节点

为首端节点的支路末端节点集合; h 为线路中 i 节点的父节点; $P_{h,t}^{\text{ac}}$ 和 $Q_{h,t}^{\text{ac}}$ 分别为交流区域支路 h_i 在 t 时刻的有功功率和无功功率; $I_{h,t}^{\text{ac}}$ 为交流区域支路 h_i 在 t 时刻的电流; $R_{h_i}^{\text{ac}}$ 和 $X_{h_i}^{\text{ac}}$ 分别为交流区域支路 h_i 的电阻和电抗; $P_{i,t}^{\text{ac}}$ 和 $Q_{i,t}^{\text{ac}}$ 分别为交流区域 i 节点在 t 时刻的注入功率; $U_{i,t}^{\text{ac}}$ 为交流区域 i 节点在 t 时刻的电压值。

$$\begin{cases} P_{i,t}^{\text{ac}} = P_{i,t}^{\text{sub}} + P_{i,t}^{\text{dg}} + P_{i,t}^{\text{ess}} + P_{i,t}^{\text{acvsc}} - P_{i,t}^{\text{acload}} \\ Q_{i,t}^{\text{ac}} = Q_{i,t}^{\text{acvsc}} + Q_{i,t}^{\text{CB}} - Q_{i,t}^{\text{acload}} \end{cases} \quad (11)$$

式中: $P_{i,t}^{\text{sub}}$ 、 $P_{i,t}^{\text{dg}}$ 、 $P_{i,t}^{\text{ess}}$ 、 $P_{i,t}^{\text{acvsc}}$ 和 $P_{i,t}^{\text{acload}}$ 分别为交流区域 i 节点在 t 时刻上级电网、分布式电源、储能、换流站和负荷的注入有功功率, 其中 $P_{i,t}^{\text{dg}}$ 为光伏和燃气轮机机组的出力之和; $Q_{i,t}^{\text{acvsc}}$ 、 $Q_{i,t}^{\text{CB}}$ 和 $Q_{i,t}^{\text{acload}}$ 分别为交流区域 i 节点在 t 时刻换流站、电容器和负荷的注入无功功率。

(2) 直流子网的潮流约束为:

$$\sum_{j \in \varsigma(i)} P_{ij,t}^{\text{dc}} = \sum_{h \in \omega(i)} \left(P_{h,t}^{\text{dc}} - R_{h_i}^{\text{dc}} \cdot (I_{h,t}^{\text{dc}})^2 \right) + P_{i,t}^{\text{dc}} \quad (12)$$

$$\begin{cases} U_{i,t}^{\text{dc}} = U_{h,t}^{\text{dc}} - 2 \left(P_{h,t}^{\text{dc}} R_{h_i}^{\text{dc}} \right) + (I_{h,t}^{\text{dc}} R_{h_i}^{\text{dc}})^2 \\ (I_{h,t}^{\text{dc}} U_{i,t}^{\text{dc}})^2 = (P_{h,t}^{\text{dc}})^2 \end{cases} \quad (13)$$

式中: $P_{h,t}^{\text{dc}}$ 为直流区域支路 h_i 在 t 时刻的有功功率; $I_{h,t}^{\text{dc}}$ 为直流区域支路 h_i 在 t 时刻的电流; $R_{h_i}^{\text{dc}}$ 为直流区域支路 h_i 的电阻; $U_{i,t}^{\text{dc}}$ 和 $U_{h,t}^{\text{dc}}$ 分别为直流区域 i 节点和 h 节点在 t 时刻的电压; $P_{i,t}^{\text{dc}}$ 为直流区域 i 节点在 t 时刻的注入功率, 其表达式与交流侧 $P_{i,t}^{\text{ac}}$ 相似, 参考式(11)。

2) 分布式电源出力约束

(1) 燃气轮机出力约束:

$$\begin{cases} -r_i \leq P_{i,t}^{\text{th}} - P_{i,t-1}^{\text{th}} \leq r_i \\ P_{\min}^{\text{th}} \leq P_{i,t}^{\text{th}} \leq P_{\max}^{\text{th}} \\ Q_{\min}^{\text{th}} \leq Q_{i,t}^{\text{th}} \leq Q_{\max}^{\text{th}} \end{cases} \quad (14)$$

式中: r_i 为燃气轮机爬坡速率; $P_{\min}^{\text{th}}$ 、 $P_{\max}^{\text{th}}$ 分别为燃气轮机输出的最小、最大有功功率; $Q_{\min}^{\text{th}}$ 、 $Q_{\max}^{\text{th}}$ 分别为燃气轮机输出的最小、最大无功功率。

(2) 光伏出力约束:

$$0 \leq P_{i,t}^{\text{pv}} \leq P_{\max}^{\text{pv}} \quad (15)$$

式中 $P_{\max}^{\text{pv}}$ 为光伏出力最大值。

(3) 风机出力约束:

$$0 \leq P_{i,t}^{\text{wind}} \leq P_{\max}^{\text{wind}} \quad (16)$$

式中 $P_{\max}^{\text{wind}}$ 为风机出力最大值。

3) 储能约束

$$\begin{cases} 0 \leq P_{i,t}^{\text{dis}} \leq \mu_{\text{ess}} P_{\max}^{\text{dis}} \\ 0 \leq P_{i,t}^{\text{ch}} \leq (1 - \mu_{\text{ess}}) P_{\max}^{\text{ch}} \\ S_{\min}^{\text{ESS}} \leq S_{i,t}^{\text{ESS}} \leq S_{\max}^{\text{ESS}} \end{cases} \quad (17)$$

$$S_{i,t}^{\text{ESS}} = S_{i,t-1}^{\text{ESS}} + \eta_{\text{ch}} P_{i,t}^{\text{ch}} - \frac{1}{\eta_{\text{dis}}} P_{i,t}^{\text{dis}} \quad (18)$$

式中: μ_{ess} 为 0-1 函数, 代表储能系统充放电状态; $P_{\max}^{\text{ch}}$ 和 $P_{\max}^{\text{dis}}$ 分别为储能系统充放电最大值; $S_{\min}^{\text{ESS}}$ 、 $S_{\max}^{\text{ESS}}$ 分别为储能系统容量最小、大值; η_{ch} 、 η_{dis} 分别为充放电效率。

4) 换流站约束

$$\begin{cases} P_i^{\text{vscloss}} = \mu |P_{i,t}^{\text{acvsc}}| \\ P_{i,t}^{\text{devsc}} = P_{i,t}^{\text{acvsc}} - P_i^{\text{vscloss}} \end{cases} \quad (19)$$

式中: P_i^{vscloss} 为换流站损耗功率; μ 为换流站功率损耗系数; $P_{i,t}^{\text{acvsc}}$ 和 $P_{i,t}^{\text{devsc}}$ 分别为换流站流入交流侧和直流侧的功率。

5) 网络重构约束

保证配电网拓扑辐射状是网络重构的先决条件, 但在交直流混合配电网中, 由于直流子网具有隔离作用, 且能够闭环运行, 因此在考虑交直流混合配电网拓扑约束时, 仅考虑交流部分的辐射状约束即可^[23]。

$$\begin{cases} \sum_{ij \in \Omega^{\text{ac}}} s_{ij} = N_b - N_s, s_{ij} \in \{0, 1\} \\ \sum_{ij \in \Omega^{\text{ac}}} P_{ij,t}^* = P_{i,t}^{\text{g}*} - P_{i,t}^{\text{load}*} \end{cases} \quad (20)$$

式中: s_{ij} 为支路 ij 的开关状态, 取 0 时表示开关断开, 取 1 时表示开关闭合; N_b 为交流区域节点数量; N_s 为电源节点数量; $P_{ij,t}^*$ 为支路 ij 在 t 时刻的虚拟电流; $P_{i,t}^{\text{g}*}$ 和 $P_{i,t}^{\text{load}*}$ 分别为虚拟电源和虚拟负荷。

6) 需求响应约束

通过引入需求响应机制, 调整负荷功率, 提升可再生能源消纳与减少系统运行成本。

$$e_{i,t} = \frac{P_{i,t}^{\text{cur}} - P_{i,t}^0}{c_j^{\text{cur}} - c_j^0} \quad (21)$$

$$\sum_{t=1}^T P_{i,t}^{\text{cur}} = \sum_{t=1}^T P_{i,t}^0 \quad (22)$$

$$c_{j,\min}^{\text{cur}} \leq c_j^{\text{cur}} \leq c_{j,\max}^{\text{cur}} \quad (23)$$

式中: $e_{i,t}$ 为 i 节点在 t 时刻的电价弹性系数; $P_{i,t}^0$ 和 $P_{i,t}^{\text{cur}}$ 分别为需求响应前后 i 节点在 t 时刻的负荷量; c_j^0 和 c_j^{cur} 分别为需求响应前后的电价; $c_{j,\max}^{\text{cur}}$ 和 $c_{j,\min}^{\text{cur}}$ 分别为 j 节点需求响应后电价的上下限。

7) 电容器运行约束

$$\begin{cases} Q_{i,t}^{\text{CB}} = n_{i,t}^{\text{CB}} q_{i,t}^{\text{CB}} \\ n_{i,t}^{\text{CB}} \leq n_{i,\max}^{\text{CB}} \end{cases} \quad (24)$$

式中: $Q_{i,t}^{\text{CB}}$ 为电容器在 i 节点在 t 时刻补偿的无功功率; $q_{i,t}^{\text{CB}}$ 为单个电容器在 i 节点在 t 时刻的无功补偿量; $n_{i,t}^{\text{CB}}$ 为 i 节点在 t 时刻接入的电容器数量; $n_{i,\max}^{\text{CB}}$ 为 i 节点可接入电容器的最大数量。

3 模型转化与求解

交直流混合配电网优化运行模型中存在二次项, 属于混合整数非线性(mixed integer nonlinear programming, MINLP)模型。针对该类非凸非线性模型的求解是配网优化运行的难题, 本文通过引入中间变量并采用二阶锥松弛的方法将模型转化为凸优化模型。

针对目标函数式(8)中的二次项 $(I_{h,t}^{\text{ac}})^2$ 和 $(I_{h,t}^{\text{dc}})^2$ 及潮流约束式(10)、式(13)中的二次项 $(U_{i,t}^{\text{ac}})^2$ 和 $(U_{i,t}^{\text{dc}})^2$, 分别引入中间变量 $\tilde{I}_{h,t}^{\text{ac}}$ 、 $\tilde{I}_{h,t}^{\text{dc}}$ 、 $\tilde{U}_{i,t}^{\text{ac}}$ 和 $\tilde{U}_{i,t}^{\text{dc}}$ 进行替换:

$$\begin{cases} \tilde{I}_{h,t}^{\text{ac}} = (I_{h,t}^{\text{ac}})^2 \\ \tilde{I}_{h,t}^{\text{dc}} = (I_{h,t}^{\text{dc}})^2 \end{cases} \quad (25)$$

$$\begin{cases} \tilde{U}_{i,t}^{\text{ac}} = (U_{i,t}^{\text{ac}})^2 \\ \tilde{U}_{i,t}^{\text{dc}} = (U_{i,t}^{\text{dc}})^2 \end{cases} \quad (26)$$

通过式(25)—(26)将含有二次项的目标函数和约束条件线性化:

$$f_{\text{loss}} = \sum_{t \in T} \Delta t \left(\sum_{h \in \Omega^{\text{ac}}} (R_{h,t}^{\text{ac}} \tilde{I}_{h,t}^{\text{ac}}) + \sum_{h \in \Omega^{\text{dc}}} (R_{h,t}^{\text{dc}} \tilde{I}_{h,t}^{\text{dc}}) \right) \quad (27)$$

$$\begin{cases} \sum_{j \in \varsigma(i)} P_{ij,t}^{\text{ac}} = \sum_{h \in \omega(i)} (P_{h,t}^{\text{ac}} - R_{h,t}^{\text{ac}} \tilde{I}_{h,t}^{\text{ac}}) + P_{i,t}^{\text{ac}} \\ \sum_{j \in \varsigma(i)} Q_{ij,t}^{\text{ac}} = \sum_{h \in \omega(i)} (Q_{h,t}^{\text{ac}} - X_{h,t}^{\text{ac}} \tilde{I}_{h,t}^{\text{ac}}) + Q_{i,t}^{\text{ac}} \end{cases} \quad (28)$$

$$\begin{cases} U_{i,t}^{\text{ac}} = U_{h,t}^{\text{ac}} - 2(P_{h,t}^{\text{ac}} R_{h,t}^{\text{ac}} + Q_{h,t}^{\text{ac}} X_{h,t}^{\text{ac}}) + \\ \tilde{I}_{h,t}^{\text{ac}} ((R_{h,t}^{\text{ac}})^2 + (X_{h,t}^{\text{ac}})^2) \\ \tilde{I}_{h,t}^{\text{ac}} \tilde{U}_{i,t}^{\text{ac}} = ((P_{h,t}^{\text{ac}})^2 + (Q_{h,t}^{\text{ac}})^2) \end{cases} \quad (29)$$

$$\sum_{j \in \varsigma(i)} P_{ij,t}^{\text{dc}} = \sum_{h \in \omega(i)} (P_{h,t}^{\text{dc}} - R_{h,t}^{\text{dc}} \tilde{I}_{h,t}^{\text{dc}}) + P_{i,t}^{\text{dc}} \quad (30)$$

$$\begin{cases} U_{i,t}^{\text{dc}} = U_{h,t}^{\text{dc}} - 2(P_{h,t}^{\text{dc}} R_{h,t}^{\text{dc}}) + \tilde{I}_{h,t}^{\text{dc}} (R_{h,t}^{\text{dc}})^2 \\ \tilde{I}_{h,t}^{\text{dc}} \tilde{U}_{i,t}^{\text{dc}} = (P_{h,t}^{\text{dc}})^2 \end{cases} \quad (31)$$

式中 h 为线路中 i 节点的父节点。

对式(29)—(31)的第二行进一步松弛并变形:

$$\tilde{I}_{h,t}^{\text{ac}} + \tilde{U}_{i,t}^{\text{ac}} \geq \sqrt{(2P_{h,t}^{\text{ac}})^2 + (2Q_{h,t}^{\text{ac}})^2 + (\tilde{I}_{h,t}^{\text{ac}} - \tilde{U}_{i,t}^{\text{ac}})^2} \quad (32)$$

$$\tilde{I}_{h,t}^{\text{dc}} + \tilde{U}_{i,t}^{\text{dc}} \geq \sqrt{(2P_{h,t}^{\text{dc}})^2 + (\tilde{I}_{h,t}^{\text{dc}} - \tilde{U}_{i,t}^{\text{dc}})^2} \quad (33)$$

将变形得到的式(32)—(33)规范化, 得到标准的二阶锥形式:

$$\begin{bmatrix} 2P_{h,t}^{\text{ac}} \\ 2Q_{h,t}^{\text{ac}} \\ \tilde{I}_{h,t}^{\text{ac}} - \tilde{U}_{i,t}^{\text{ac}} \end{bmatrix}_2 \leq \tilde{I}_{h,t}^{\text{ac}} + \tilde{U}_{i,t}^{\text{ac}} \quad (34)$$

$$\begin{bmatrix} 2P_{h,t}^{\text{dc}} \\ \tilde{I}_{h,t}^{\text{dc}} - \tilde{U}_{i,t}^{\text{dc}} \end{bmatrix}_2 \leq \tilde{I}_{h,t}^{\text{dc}} + \tilde{U}_{i,t}^{\text{dc}} \quad (35)$$

由于式(19)中含有绝对值, 引入变量 $p_{i,t}^{\text{acvsc}}$ 进行替换, 并添加如下约束:

$$\begin{cases} p_{i,t}^{\text{acvsc}} \geq 0 \\ p_{i,t}^{\text{acvsc}} \geq P_{i,t}^{\text{acvsc}} \\ p_{i,t}^{\text{acvsc}} \geq -P_{i,t}^{\text{acvsc}} \end{cases} \quad (36)$$

通过上述步骤将非凸非线性的 MINLP 模型转化为易于求解的凸优化模型, 采用 MATLAB 中的 Yalmip 平台调用 Cplex 工具箱求解模型。

4 算例分析

为验证所提低碳运行策略的有效性, 本文参照文献[24]的模型参数搭建修改后的 IEEE33 节点交直流混合配电网系统进行仿真分析, 结构如图 1 所示。算例的计算环境为 Win10 系统, 内存为 4 GB, 操作系统为 64 bit, 处理器为 Intel core i5, 软件版本为 Matlab R2021a。

4.1 参数说明

交直流混合配电网系统中分布式光伏与风力机

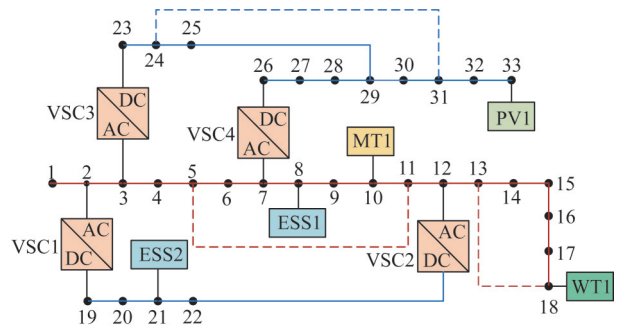


图 1 IEEE33 节点交直流混合配电网架构

Fig. 1 IEEE 33-node AC/DC hybrid distribution grid architecture

组额定功率为 800 kW, 风光出力预测如图 2 所示。微型燃气轮机额定功率为 500 kW, 两台储能装置的充放电效率为 0.95, 荷电状态的最小值和最大值分别为 0.1 和 0.9。向上级电网购电费用采用分时电价, 数据取自文献[25]。交直流子系统间的交换功率也采用分时电价, 假设为上级电网分时电价的 0.7 倍。系统节点电压允许波动范围为 0.95~1.05 p. u.。配电网系统其余运行参数见表 1。

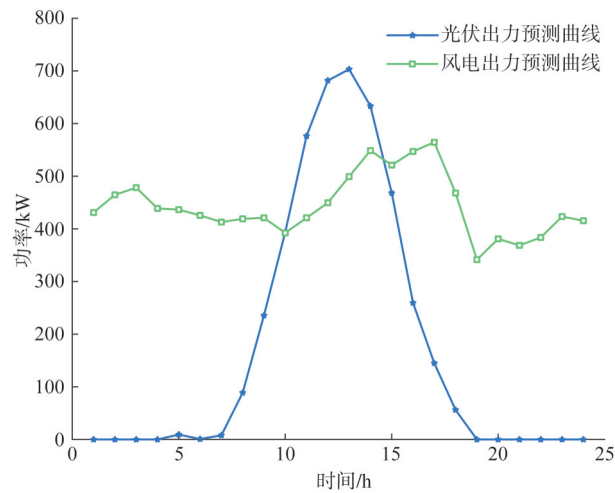


图2 风光出力预测曲线

Fig. 2 Photovoltaic and wind power output prediction curves

表 1 系统运行参数

Tab. 1 System operating parameters

参数	数值
风光发电单价/(元·kWh ⁻¹)	0.3
燃气轮机发电单价/(元·kWh ⁻¹)	0.6
换流站损耗系数	0.1
燃气轮机单位发电功率碳排放因子/(t·kWh ⁻¹)	0.000 65
主网购电单位功率碳排放因子/(t·kWh ⁻¹)	0.000 85
单位电量的碳排放额度/(t·kWh ⁻¹)	0.000 57
碳交易价格/(元·t ⁻¹)	70

4.2 不同场景下优化结果分析

为验证本文所提方法的有效性, 设定以下 4 种情景进行仿真分析。

情景 1: 不考虑网络重构与需求响应的配电网优化运行方案;

情景 2: 不考虑网络重构, 仅考虑需求响应的配电网优化运行方案;

情景 3: 不考虑需求响应, 仅考虑网络重构的配电网优化运行方案;

情景 4: 考虑网络重构与需求响应的配电网优化运行方案。

上述各情景下的系统运行结果如表 2 所示。

表 2 各情景下系统运行结果

Tab. 2 Results of system operation under various scenarios

情景编号	购电成本/万元	发电成本/万元	充放电成本/万元	网络损耗/MW	风光损失率	开关次数	总成本/万元
1	3.199	0.619	0.025	0.246	11.699		4.183
2	2.159	0.864	0.023	0.178	8.214		3.156
3	1.724	1.015	0.020	0.097	5.057	6	2.771
4	1.652	1.014	0.019	0.098	5.056	2	2.699

根据表 2 的结果, 对比情景 1 和情景 2。情景 2 引入需求响应后的负荷及需求响应前的原负荷对比如图 3 所示。可以看出, 引入需求响应后高峰期时段的负荷转移到了低谷期, 有效减少了系统负荷峰谷差。考虑需求响应后系统的运行结果在发电成本、网络损耗和风光损失率上下降程度明显。这是因为需求响应能够实现负荷时间上的均衡化, 一方面在分布式电源出力高峰期增加负荷, 提升系统的可再生能源消纳能力; 另一方面优化网络中电力的传输距离和功率, 降低系统网络损耗。

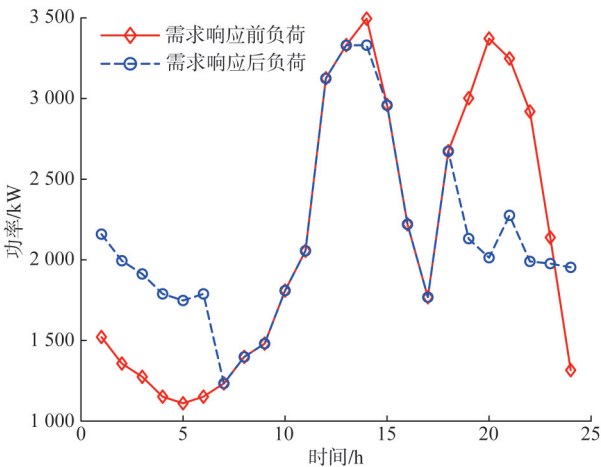


图3 需求响应前后的负荷

Fig. 3 Loads before and after demand response

对比情景 1 和情景 3 的仿真结果可知, 两种情景的系统运行方案在购电成本、发电成本、储能充放电成本、网络损耗和风光损失率上均有较大差异。情景 3 在考虑网络重构后系统的供电路径得到优化负荷得到了更均匀的分配, 降低了电价高峰时段对上级电网的依赖并且优化了线路的压力, 从而

减少购电成本与网络损耗,但由于负荷未发生变化,因此分布式电源出力增加,发电成本和风光利用率显著提升。

对比情景 1 和情景 4,情景 4 下系统的网络损耗、风光损失率和总运行成本较情景 1 分别降低了 148 kW、6.61% 和 1.48 万元,同比下降 60%、48% 和 35%。对比情景 2 和情景 4,在已考虑需求响应的情况下,考虑网络重构能够对系统进一步优化,系统的总成本和网络损耗分别降低了 0.46 万元和 80 kW。这是因为结合需求响应,网络重构可以进一步调整分布式能源和储能设备的运行策略,在满足负荷的同时,优化资源配置,从而降低整体的系统运行成本及能量损耗。对比情景 3 和情景 4,在已考虑了网络重构的情况下,考虑需求响应对系统降低运行成本,提升清洁能源消纳量的作用有限,但能够在保持系统运行经济性的前提下减少联络开关的工作次数,这是由于两者都能够优化系统潮流分布,在网络重构和需求响应的协同作用下能以开关次数最低的情况下优化电力流动,从而促进运行成本最小化和资源利用最大化,提升系统稳定性。

上述各情景的节点电压曲面图如图 4 所示,系统负荷低谷期(以 7:00 为例)和高峰期(以 14:00 为例)的节点电压如图 5 所示。

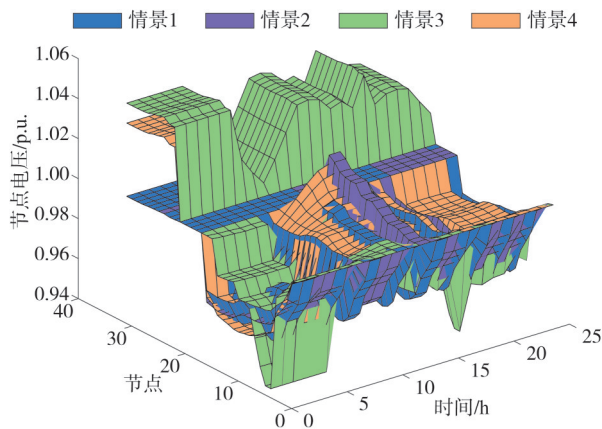
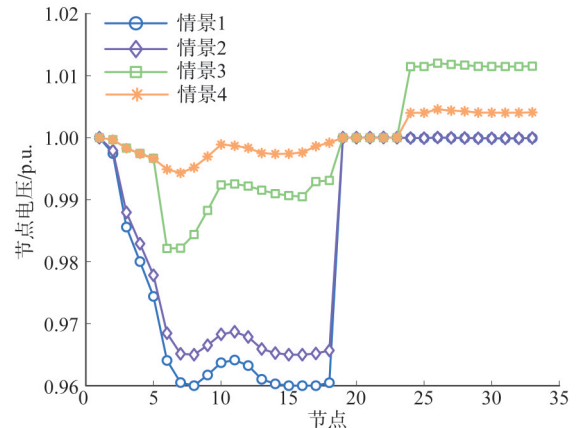


图 4 各情景下节点电压曲面图

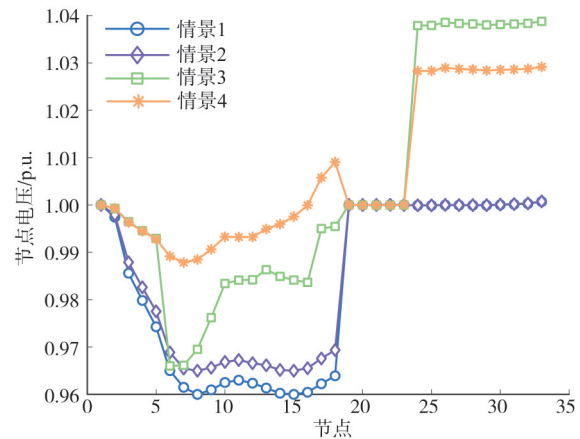
Fig. 4 Nodal voltage surface plot for each scenario

如图 4 所示,各场景的系统节点电压都处于安全范围内,说明了情景设置的合理性。

由图 5 可知,情景 2 在情景 1 的基础上考虑了需求响应,使得系统的电压偏差降低,这是因为削峰填谷使得负荷均匀分布,提升电压水平。情景 3 在情景 1 的基础上考虑了网络重构,通过优化供电



(a) 07:00 各情景下节点电压曲面图



(b) 14:00 各情景下节点电压曲面图

图 5 负荷峰谷期各情景下节点电压曲面图

Fig. 5 Nodal voltage surfaces for each scenario during peak and valley load periods

路径提升负荷分布均衡度,显著提升了系统的电压水平。情景 4 综合考虑了网络重构和需求响应,实现了系统负荷的最优分布,从而改善电压分布。

情景 4 下同时考虑网络重构和需求响应的配电网运行方案如图 6 所示,图 7 为该情景下 VSC 的运行方案。

由图 6 可知,在分时电价和需求响应的作用下,系统在低电价时段尽可能的向上级电网购电,一部分维持电量平衡,另一部分储存在储能装置中用于负荷高峰期放电;在高电价时段也是光伏出力的高峰期,系统通过降低上级电网购电量并调整燃气轮机发电,维持电量平衡和保证经济运行。由图 7 可知,系统绝大多数时间都由交流子网向直流子网供电,这是因为直流子网只在 33 节点处接有分布式光伏电源,在高光伏出力时间段(11 时—15 时),光伏能够满足直流子网的负荷需求,盈余的电量一部分

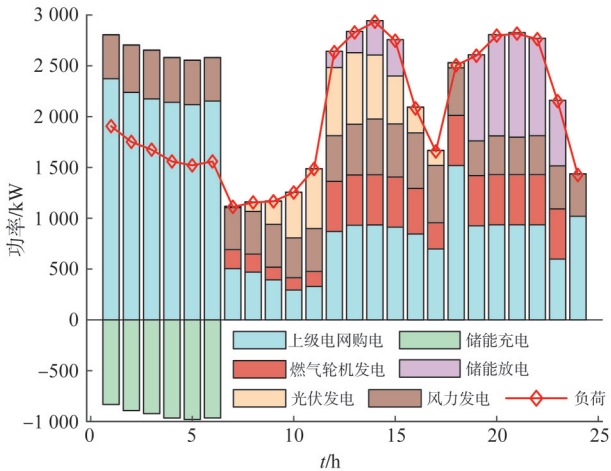


图 6 计及网络重构和需求响应的配电网运行方案

Fig. 6 Distribution grid operation schemes accounting for network reconfiguration and demand response

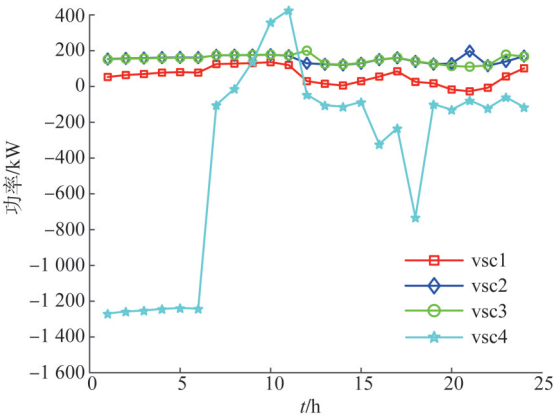


图 7 情景 4 下 VSC 的运行方案

Fig. 7 Operational scenarios for VSC under Scenario 4

输入储能装置, 另一部分通过 VSC 向交流系统输送, 但在光伏出力较低及夜间不出力的时段, 储能无法满足直流区域负荷需求, 由交流子网向直流子网输送功率, 从而维持直流子网的功率平衡。

4.3 碳交易机制分析

为分析碳交易机制对配电网经济低碳运行的影响, 本文在前述计及网络重构和需求响应的配电网运行基础上设置以下 3 种情景进行分析。

情景 1: 以系统购电成本、发电成本和网络损耗成本为目标函数的配电网优化调度方案。

情景 2: 以系统购电成本、发电成本、网络损耗成本和碳交易成本为目标函数的配电网优化调度方案。

情景 3: 以系统购电成本、发电成本、网络损耗成本和阶梯式碳交易成本为目标函数的配电网优

化调度方案。

1) 阶梯式碳交易机制对配电网运行的影响

上述 3 种情景下系统碳排放量和运行总成本的对比情况如表 3 所示。

表 3 各情景下系统碳排放量和运行总成本对比结果

Tab. 3 Comparison of system carbon emissions and total operating costs for each scenario

情景编号	1	2	3
系统运行总成本/万元	2.77	3.06	3.29
碳排放量/t	36.54	29.58	22.53

由表 3 可知, 相较于情景 1, 情景 2 和情景 3 的运行总成本虽然增加了 0.29 万元、0.52 万元, 但是碳排放量分别减少了 6.96 t 和 14 t, 即降低了 19.04% 和 38.33%。这是由于系统运行成本中涵盖了碳交易成本, 系统为减少碳排放造成的惩罚, 在调度过程中会加大可再生能源的消纳, 减少向上级电网购电以及燃气轮机发电, 因此系统总成本上升, 碳排放量下降。相较于情景 2, 情景 3 的总成本包括了阶梯式碳交易成本, 进一步激发了系统的低碳运行潜力, 提升可再生能源消纳能力。相较于情景 2, 情景 3 的碳交易成本随着碳排放量呈阶梯式增长, 能够进一步激发系统的低碳运行潜力, 提升可再生能源消纳能力。因此, 引入阶梯式碳交易机制能够在保证系统运行经济性的前提下最大限度地降低碳排放。

2) 阶梯式碳交易价格对配电网运行的影响

为分析碳交易价格对配电网运行所产生碳排放量及成本的影响, 以情景 3 为基础, 改变碳交易价格, 得到如图 8 所示的碳交易价格和配电网运行碳排放量及系统总成本的关系。

由图 8 可知, 碳交易价格的上涨趋势伴随着系统碳排放量的逐渐减少以及总成本的上升。在碳交易价格初步上涨的阶段, 其对系统碳排放量的影响较为显著; 然而, 当碳交易价格上涨至一定水平后, 其对碳排放量的影响逐渐减弱。这一现象的原因在于: 随着碳交易价格的攀升, 为了降低碳排放造成的惩罚配电网会通过优化运行策略来减少碳排放, 并借助碳交易获取收益, 进而降低整体运营成本。但当碳交易价格达到一定高度后, 受风光储等分布式能源装机容量等因素的制约碳减排的效果开始逐渐减弱, 碳排放量不再随着价格上升继续下降, 趋于稳定。因此, 通过制定合理的碳交易价格

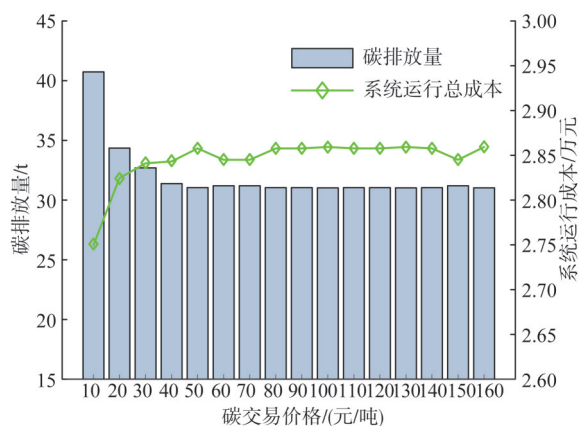


图8 不同碳交易价格下系统碳排放量与运行总成本

Fig. 8 System carbon emissions and total operating costs under different carbon trading prices

能够实现配电网运行经济性和低碳性。

5 结论

针对源荷波动性对交直流混合配电网安全可靠运行造成的影响,本文提出一种计及网络重构与需求响应的交直流混合配电网低碳优化运行方法。得到的主要结论如下。

1) 计及网络重构和需求响应的配电网优化调度方法能够提升分布式可再生能源的消纳能力与系统运行经济性。网络重构通过优化供电路径实现负荷空间上的均衡分布,需求响应通过引导用户用电行为实现负荷时间上的均衡分布,在两者的协同作用下优化负荷时空分布,从而改善系统电压分布,提升系统资源利用率。

2) 提出面向交直流混合配电网低碳运行的方法,有效降低了系统运行产生的碳排放量。在阶梯式碳交易机制的作用下,为减少碳排放造成的惩罚,在调度过程中会加大可再生能源的消纳,减少上级电网购电以及燃气轮机发电,从而降低购电和发电成本,减少碳排放量。

3) 系统碳排放量随着碳交易价格的上升呈现快速下降后趋于平稳的现象。这是因为随着碳交易价格的攀升,为了降低碳排放造成的惩罚,配电网会通过优化运行策略来减少碳排放,进而降低整体运营成本。但当碳交易价格达到一定高度后,受光储等分布式能源装机容量等因素的制约,碳减排的效果开始逐渐减弱。

本文所提方法中网络重构为静态重构,未计及

动态重构。在后续的研究当中将围绕此展开。

参考文献

- [1] 张璐,余顺江,王辰,等.计及VSC运行方式与故障恢复优化的交直流混合配电网可靠性评估[J].电网技术,2022,46(1):292-303.
ZHANG Lu, YU Shunjiang, WANG Chen, et al. Reliability evaluation of AC/DC hybrid distribution network considering VSC operation mode and fault recovery optimization[J]. Power System Technology, 2022, 46(1): 292-303.
- [2] 傅守强,陈翔宇,张立斌,等.面向韧性提升的交直流混合配电网协同恢复方法[J].中国电力,2023,56(7):95-106.
FU Shouqiang, CHEN Xiangyu, ZHANG Libin, et al. Coordinated restoration method of hybrid AC/DC distribution networks for resilience enhancement[J]. Electric Power, 2023, 56(7): 95-106.
- [3] 付宇,白浩,李跃,等.面向高比例光伏消纳的低压交直流混合配电网时空协调优化方法[J].南方电网技术,2023,17(1):84-93.
FU Yu, BAI Hao, LI Yue, et al. Spatial-temporal coordinated optimization method of low voltage hybrid AC/DC distribution network for accommodation of high-proportion PVs [J]. Southern Power System Technology, 2023, 17(1): 84-93.
- [4] 朱继忠,何晨可,陈婧韵,等.综合能源系统环境下电动汽车充换电设施规划综述[J].南方电网技术,2022,16(1):14-32.
ZHU Jizhong, HE Chenke, CHEN Jingyun, et al. Overview of electric vehicle charging and swapping facilities planning under the environment of integrated energy system [J]. Southern Power System Technology, 2022, 16(1): 14-32.
- [5] 唐文虎,张银,钱瞳.考虑配电网重构和楼宇群主动需求响应的集成楼宇群配电网优化控制[J].中国电机工程学报,2023,43(8):2966-2979.
TANG Wenhui, ZHANG Yin, QIAN Tong. Optimal control of buildings-to-distribution-network integration system considering reconfiguration of distribution network and active demand response of buildings[J]. Proceedings of the CSEE, 2023, 43(8): 2966-2979.
- [6] 王雅丽,刘洪,赵娟,等.基于网络重构和电热联合需求响应的配电网安全经济调度[J].电力建设,2019,40(4):90-97.
WANG Yali, LIU Hong, ZHAO Juan, et al. Distribution network economic dispatch based on network reconfiguration and power-heat combined demand response[J]. Electric Power Construction, 2019, 40(4): 90-97.
- [7] 黄鸣宇,张庆平,张沈习,等.高比例清洁能源接入下计及需求响应的配电网重构[J].电力系统保护与控制,2022,50(1):116-123.
HUANG Mingyu, ZHANG Qingping, ZHANG Shenxi, et al. Distribution network reconfiguration considering demand-side response with high penetration of clean energy [J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(1): 116-123.
- [8] 周丹,李嘉杰,邓美玲,等.考虑多分布式水电协调运行策略的微电网重构方法[J].南方电网技术,2023,17(12):63-70.
ZHOU Dan, LI Jiajie, DENG Meiling, et al. Microgrid reconfiguration method considering coordinated operation strategy of multi-distributed hydropower [J]. Southern Power System Technology, 2023, 17(12): 63-70.
- [9] 刘永梅,王金丽,杨红磊,等.计及柔性负荷调节能力的有源配电网动态优化方法[J].高电压技术,2021,47(1):73-80.

- LIU Yongmei, WANG Jinli, YANG Honglei, et al. Dynamic optimal method of distribution network in consideration of flexible load adjustment capability[J]. High Voltage Engineering, 2021, 47(1): 73 – 80.
- [10] 孙旭,邱晓燕,张志荣,等.基于数据驱动的交流配电网分布鲁棒优化调度[J].电网技术,2021,45(12):4768–4778.
- SUN Xu, QIU Xiaoyan, ZHANG Zhirong, et al. Distributed robust optimal dispatching of AC/DC distribution network based on data driven mode[J]. Power System Technology, 2021, 45(12): 4768 – 4778.
- [11] LI J, WANG G, TANG T, et al. Optimization of distribution network reconfiguration based on Markov chain Monte Carlo method[J]. Energy Reports, 2022(2): 1 – 10.
- [12] 李振坤,汪璇璇,时珊珊,等.考虑微网间功率交互的配电网双层优化调度[J].南方电网技术,2022,16(9):107–118.
- LI Zhenkun, WANG Xuanxuan, SHI Shanshan, et al. Bi-level optimal dispatch of distribution network considering power interaction among microgrids[J]. Southern Power System Technology, 2022, 16(9): 107 – 118.
- [13] 石文超,吕林,高红均,等.考虑需求响应和电动汽车参与的主动配电网经济调度[J].电力系统自动化,2020,44(11):41–51.
- SHI Wenchao, LÜ Lin, GAO Hongjun, et al. Economic dispatch of active distribution network with participation of demand response and electric vehicle[J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(11): 41 – 51.
- [14] 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.
- [15] 史伟平,莫峻,杨辉,等.碳交易机制下基于合作博弈的综合能源系统经济性分析[J/OL].南方电网技术:1–13[2024–07–24].<https://nfdwjs.csg.cn/gateway-web/zh/debutDetail.html?serialNum=20231227001>.
- SHI Wei-Ping, MO Jun, YANG Hui, et al. Economic analysis of integrated energy system based on cooperative game under carbon trading mechanism[J/OL]. Southern Power System Technology, 1 – 12 [2024 – 07 – 24]. <https://nfdwjs.csg.cn/gateway-web/zh/debutDetail.html?serialNum=20231227001>.
- [16] 陶伟健,艾芊,李晓露.虚拟电厂协同调度及市场交易的研究现状及展望[J].南方电网技术,2024,18(12):62–76.
- TAO Weijian, AI Qian, LI Xiaolu. Research status and prospects of collaborative scheduling and market trading of virtual power plants[J]. Southern Power System Technology, 2024, 18(12): 62 – 76.
- [17] 陈俊先,贾燕冰,韩肖清,等.考虑需求侧碳交易机制的多微电网分布式协同优化调度[J].电网技术,2023,47(6):2196–2207.
- CHEN Junxian, JIA Yanbing, HAN Xiaoqing et al. Distributed coordinated optimal scheduling of multi-micro integrated energy systems considering demand-side carbon trading mechanism[J]. Power System Technology, 2023, 47(6): 2196 – 2207.
- [18] 王继东,边翊楠,许秋铭,等.考虑风险和碳交易机制的微电网分布鲁棒优化调度[J].高电压技术,2024,50(8):3477–3487.
- WANG Jidong, BIAN Yinan, XU Qiuming, et al. Distributionally robust optimal dispatching of microgrid considering risk and carbon trading mechanism[J]. High Voltage Engineering, 2024, 50(8): 3477 – 3487.
- [19] 张世旭,李姚旺,刘伟生,等.面向微电网群的云储能经济-低碳-可靠多目标优化配置方法[J].电力系统自动化,2024,48(1):21–30.
- ZHANG Shixu, LI Yaowang, LIU Weisheng, et al. Economic, low-carbon and reliable multi-objective optimal configuration method of cloud energy storage for microgrid clusters[J]. Automation of Electric Power Systems, 2024, 48(1): 21 – 30.
- [20] 席俊辉,童晓阳,李智,等.考虑风电不确定性的交直流配电网低碳分布鲁棒优化调度[J].电力自动化设备,2023,43(11):59–66.
- XI Junye, TONG Xiaoyang, LI Zhi, et al. Low-carbon distributionally robust optimal scheduling for AC / DC distribution network considering wind power uncertainty[J]. Electric Power Automation Equipment, 2023, 43(11): 59 – 66.
- [21] 崔杨,曾鹏,仲悟之,等.考虑阶梯式碳交易的电-气-热综合能源系统低碳经济调度[J].电力自动化设备,2021,41(3):10–17.
- CUI Yang, ZENG Peng, ZHONG Wuzhi, et al. Low-carbon economic dispatch of electricity-gas-heat integrated energy system based on ladder-type carbon trading[J]. Electric Power Automation Equipment, 2021, 41(3): 10 – 17.
- [22] 赵毅,王维庆,闫斯哲.考虑阶梯型碳交易的风光储联合系统分布鲁棒优化调度[J].电力系统保护与控制,2023,51(6):127–136.
- ZHAO Yi, WANG Weiqing, YAN Sizhe. Distributionally robust optimization scheduling of a joint wind-solar-storage system considering step-type carbon trading[J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(6): 127 – 136.
- [23] ZHANG L, WANG C, LIANG J, et al. A coordinated restoration method of hybrid AC/DC distribution network for resilience enhancement[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2023, 14(1): 112 – 125.
- [24] HAYTHAM M A. Energy management of AC – DC hybrid distribution systems considering network reconfiguration[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2019, 34(6): 4583 – 4594.
- [25] 王家怡,高红均,刘友波,等.考虑风电不确定性的交直流混合配电网分布式优化运行[J].中国电机工程学报,2020,40(2):550–563.
- WANG Jiayi, GAO Hongjun, LIU Youbo, et al. A distributed operation optimization model for AC/DC hybrid distribution network considering wind power uncertainty[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(2): 550 – 563.

收稿日期:2024-09-23;网络首发日期:2025-03-02

作者简介:

石松浩(2000),男,硕士研究生,研究方向为交直流混合配电网优化运行,1400489462@qq.com;

邹阳(1980),男,通信作者,副教授,博士,从事配电网优化运行方面研究,24001744@qq.com;

姚雨佳(2000),女,硕士研究生,研究方向为微电网优化运行,1472596401@qq.com。