

# 高比例清洁能源接入下计及需求响应的配电网重构

黄鸣宇<sup>1</sup>, 张庆平<sup>1</sup>, 张沈习<sup>2</sup>, 闫振华<sup>1</sup>, 高博<sup>1</sup>, 李秀广<sup>1</sup>

(1. 国网宁夏电力有限公司电力科学研究院, 宁夏 银川 750000;  
2. 电力传输与功率变换控制教育部重点实验室(上海交通大学), 上海 200240)

**摘要:** 提出了高比例清洁能源接入下计及需求响应的配电网重构方法。首先, 以考虑网损成本、弃风弃光成本和开关操作惩罚成本的综合成本最小为目标, 建立高比例清洁能源接入下计及需求响应的配电网重构模型。然后, 针对配电网重构模型的非凸性, 引入中间变量并对其进行二阶锥松弛, 构建混合整数凸规划模型, 使其能够在获得全局最优解的同时提高求解效率。最后, 采用改进的 IEEE 33 节点配电网进行算例仿真, 分析了需求响应措施和清洁能源渗透率对配电网重构结果的影响。算例结果表明, 计及需求响应的配电网重构方法, 可以有效提升清洁能源消纳能力, 平移负荷峰谷差, 提升运行经济性。

**关键词:** 高比例清洁能源; 需求响应; 配电网重构; 混合整数二阶锥规划

## Distribution network reconfiguration considering demand-side response with high penetration of clean energy

HUANG Mingyu<sup>1</sup>, ZHANG Qingping<sup>1</sup>, ZHANG Shenxi<sup>2</sup>, YAN Zhenhua<sup>1</sup>, GAO Bo<sup>1</sup>, LI Xiuguang<sup>1</sup>

(1. Electric Power Research Institute, Ningxia Electric Power Co., Ltd., Yinchuan 750000, China; 2. Key Laboratory of Control of Power Transmission and Conversion, Ministry of Education, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China)

**Abstract:** A distribution network reconfiguration method with high penetration of clean energy considering demand-side response is proposed. First, the distribution network reconfiguration model with high penetration of clean energy considering demand-side response is established. Its objective function is to minimize the comprehensive cost including the costs of network loss, abandonment of wind power and photovoltaic power, and switching operation. Then, for a non-convex model of distribution network reconfiguration, a mixed integer convex programming model (MISOCP) is obtained by introducing intermediate variables and performing second-order cone relaxation. This can avoid the global optimal solution while improving the solving efficiency. Finally, case studies are carried out on the improved IEEE 33-bus distribution network, and the influence of demand-side response and clean energy penetration rates on the reconfiguration results is analyzed. The results show that the distribution network reconfiguration method considering demand-side response can effectively improve the clean energy consumption capacity, smooth the load peak-to-valley difference, and improve the economy of network operation.

This work is supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 52177099).

**Key words:** high penetration of clean energy; demand-side response; distribution network reconfiguration; MISOCP

## 0 引言

配电网重构作为配电网优化运行的手段之一, 通过改变配电网的拓扑结构, 以达到降低网损、改

善电压分布、提升系统的可靠性与经济性等目的<sup>[1-2]</sup>。近年来, 随着全球能源消耗快速增长以及环境的日趋恶化<sup>[3-4]</sup>, 清洁能源飞速发展, 分布式电源(Distributed Generator, DG)大量接入配电网中。DG 因其随机性和波动性, 大量接入给配电网带来巨大冲击, 也给配电网重构带来严峻的挑战<sup>[5-7]</sup>, 因此有必要研究适用于高比例清洁能源接入下的配电网重构方法。

**基金项目:** 国家自然科学基金项目资助(52177099); 国网宁夏电力有限公司科技项目资助(SGNXDK00WLJS2000023)

目前, 已有相关文献对清洁能源接入下的配电网重构做了相关研究<sup>[8-14]</sup>。文献[8]针对 DG 与电力负荷的不确定性, 对多场景配电网网络重构策略进行了研究。文献[9]针对含分布式电源的配电网在故障恢复过程中出现部分负荷无法恢复供电的问题, 提出了孤岛划分与网络重构相配合的配电网故障恢复策略。文献[11]研究了考虑多类型分布式电源并网的配电网重构模型, 并提出对应求解方法。文献[12]考虑网络重构等主动管理措施与无功优化相配合的问题, 建立基于混合整数二阶锥规划的配电网优化模型并对模型进行求解。

目前对于配电网重构的求解算法研究主要分为智能算法和传统数学优化算法两类。智能算法(如遗传算法、粒子群算法、模拟退火算法等)<sup>[15-18]</sup>通过智能寻优的方法对配电网重构模型进行求解。文献[16]针对粒子群算法早熟的问题, 结合配电网特点, 提出了改进粒子群算法, 并将其应用于配电网重构优化中。文献[17]针对传统遗传算法求解效率低、灵活性差、搜索精度低、易陷入局部最优的问题, 提出基于“门当户对”原则的多种染色体交叉策略, 丰富种群的进化方式, 以提高算法的灵活性和收敛精度。传统数学优化算法<sup>[19-23]</sup>则是通过二阶锥松弛的方法将配电网重构的非凸模型进行转凸处理, 并用最优化的方法进行求解。文献[21]针对含可再生能源的配电网重构问题, 提出了混合整数二阶锥规划模型, 并使用多时段耦合复杂性的内点法进行求解。文献[22]通过二阶锥松弛的方式, 建立配电网重构的锥规划模型并进行优化求解。

从上述文献可以看出, 目前对于配电网重构的研究很多, 然而上述文献均没有在配电网重构中考虑需求响应的影响, 也没有研究不同清洁能源渗透率对配电网重构的影响。基于此, 本文在高比例清洁能源接入的背景下, 提出计及需求响应的配电网重构模型, 有效利用需求响应进一步降低配电网重构费用并减少弃风弃光率, 提高配电网对清洁能源的消纳能力。在求解算法方面, 本文基于混合整数二阶锥规划对配电网重构模型进行求解, 针对配电网重构的非凸模型, 通过引入中间变量并对配电网重构模型进行合理二阶锥松弛, 获得混合整数凸规划模型并进行求解。

## 1 计及需求响应的配电网重构模型

### 1.1 目标函数

以提高清洁能源的消纳率、减小配电网的运行成本为目标, 本文在高比例清洁能源接入背景下提出了考虑需求响应的配电网重构模型。该模型的目

标函数为配电网综合运行成本最小, 其中考虑了网损成本、弃风弃光成本以及分段开关操作惩罚成本。目标函数的计算方法如式(1)所示。

$$\min f = \sum_{t=1}^T [c_1 \cdot g_{1,t} + c_2 \cdot g_{2,t} + c_3 \cdot g_3] \quad (1)$$

式中:  $T$  为配电网重构持续时间;  $g_{1,t}$  为系统  $t$  时段的网络损耗;  $g_{2,t}$  为系统  $t$  时段的弃风弃光量;  $g_3$  为系统分段开关操作次数;  $c_1$ 、 $c_2$ 、 $c_3$  分别为网络损耗成本系数、弃风弃光惩罚系数以及分段开关操作惩罚成本系数。

式(1)中的网络损耗、弃风弃光量以及分段开关操作次数的具体计算方法如下。

#### ① 网络损耗

$$g_{1,t} = \sum_{ij \in \Omega} I_{ij,t}^2 R_{ij} \Delta t \quad (2)$$

式中:  $I_{ij,t}$  为  $t$  时段支路  $ij$  电流的有效值;  $R_{ij}$  为支路  $ij$  的电阻值。

#### ② 弃风弃光量

$$g_{2,t} = \sum_{i \in \Phi_{\text{wind}}} (P_{i,t}^{\text{wind},f} - P_{i,t}^{\text{wind}}) \Delta t + \sum_{i \in \Phi_{\text{pv}}} (P_{i,t}^{\text{pv},f} - P_{i,t}^{\text{pv}}) \Delta t \quad (3)$$

式中:  $\Phi_{\text{wind}}$ 、 $\Phi_{\text{pv}}$  分别表示系统中风机、光伏接入节点的集合;  $P_{i,t}^{\text{wind},f}$ 、 $P_{i,t}^{\text{pv},f}$  分别表示  $t$  时刻接入节点  $i$  的风机和光伏的输出功率;  $P_{i,t}^{\text{wind}}$ 、 $P_{i,t}^{\text{pv}}$  分别表示在  $t$  时刻风机和光伏注入节点  $i$  的实际功率。

#### ③ 分段开关操作次数

$$g_3 = \sum_{ij \in \Omega} |\alpha_{ij} - \alpha_{ij,0}| \quad (4)$$

式中:  $\alpha_{ij}$ 、 $\alpha_{ij,0}$  分别表示配电网重构后以及重构前支路  $ij$  开关的状态, 0 表示支路  $ij$  开关断开, 1 表示支路  $ij$  开关闭合;  $\Omega$  为配电网所有支路集合。

## 1.2 约束条件

### (1) 节点功率平衡约束

$$\begin{cases} P_{i,t} = \sum_{j \in C(i)} \alpha_{ij} [G_{ij} V_{i,t}^2 - V_{i,t} V_{j,t} (G_{ij} \cos \delta_{ij,t} + B_{ij} \sin \delta_{ij,t})] \\ Q_{i,t} = \sum_{j \in C(i)} \alpha_{ij} [-B_{ij} V_{i,t}^2 + V_{i,t} V_{j,t} (B_{ij} \cos \delta_{ij,t} - G_{ij} \sin \delta_{ij,t})] \end{cases} \quad (5)$$

式中:  $V_{i,t}$ 、 $V_{j,t}$  为  $t$  时段节点  $i$ 、 $j$  电压;  $G_{ij}$ 、 $B_{ij}$  为支路  $ij$  的电导和电纳;  $\delta_{ij,t}$  为  $t$  时段支路  $ij$  的电压相角差;  $C(i)$  为与节点  $i$  相连的所有节点的集合。

### (2) 节点电压约束

在进行配电网重构时, 配电网中节点电压需要

满足上下限约束, 即

$$V_i^{\min} \leq V_{i,t} \leq V_i^{\max} \quad (6)$$

式中,  $V_i^{\max}$ 、 $V_i^{\min}$  分别表示节点  $i$  的电压上下限。

### (3) 支路电流约束

由于线路传输容量的限制, 支路传输电流需要满足一定的约束条件, 即

$$I_{ij,t} \leq I_{ij}^{\max} \quad (7)$$

式中,  $I_{ij}^{\max}$  为支路  $ij$  允许流过的电流最大值。

### (4) DG 功率约束

DG 注入配电网的功率应满足

$$\begin{cases} P_{DG,i,t}^{\min} \leq P_{DG,i,t} \leq P_{DG,i,t}^{\max} \\ Q_{DG,i,t}^{\min} \leq Q_{DG,i,t} \leq Q_{DG,i,t}^{\max} \end{cases} \quad (8)$$

式中:  $P_{DG,i,t}$ 、 $Q_{DG,i,t}$  为  $t$  时段节点  $i$  处 DG 的有功出力和无功出力;  $P_{DG,i,t}^{\max}$ 、 $Q_{DG,i,t}^{\max}$  为  $t$  时段节点  $i$  处 DG 的有功出力和无功出力上限;  $P_{DG,i,t}^{\min}$ 、 $Q_{DG,i,t}^{\min}$  为  $t$  时段节点  $i$  处 DG 的有功出力和无功出力下限。

### (5) 网络结构约束

配电网在重构过程中需满足连通性约束与辐射状约束, 即

$$\begin{cases} f_{di} + \sum_{j \in C(i)} \alpha_{ij} f_{ij,t} = 0 \\ N_b = N_n - N_s \end{cases} \quad (9)$$

式中:  $f_{di}$  为节点  $i$  的虚拟负荷, 一般可取单位 1;  $f_{ij,t}$  为  $t$  时段支路  $ij$  处流过的虚拟流量;  $N_b$  为支路数;  $N_n$  为节点数;  $N_s$  为电源数。

### (6) 储能电池充放电状态及功率约束

储能电池在充放电过程中应该满足充放电状态及功率约束, 即

$$\begin{cases} y_{e,i,t}^{\text{ch}} + y_{e,i,t}^{\text{dis}} \leq 1 \\ y_{e,i,t}^{\text{ch}} \in \{0,1\} \quad y_{e,i,t}^{\text{dis}} \in \{0,1\} \\ 0 \leq P_{e,i,t}^{\text{ch}} \leq y_{e,i,t}^{\text{ch}} P_{e,i}^{\text{ch,max}} \\ 0 \leq P_{e,i,t}^{\text{dis}} \leq y_{e,i,t}^{\text{dis}} P_{e,i}^{\text{dis,max}} \end{cases} \quad (10)$$

式中:  $y_{e,i,t}^{\text{ch}}$ 、 $y_{e,i,t}^{\text{dis}}$  分别代表节点  $i$  处储能在  $t$  时段充放电状态;  $P_{e,i}^{\text{ch,max}}$ 、 $P_{e,i}^{\text{dis,max}}$  分别表示节点  $i$  处储能的充放电最大功率;  $P_{e,i,t}^{\text{ch}}$ 、 $P_{e,i,t}^{\text{dis}}$  分别表示节点  $i$  处储能在  $t$  时段充放电功率。

### (7) 储能电池剩余容量约束

由于储能的充放电深度限制, 储能在运行过程应当满足储能剩余容量约束, 即

$$\begin{cases} E_{e,i,t+\Delta t}^{\text{ESS}} = E_{e,i,t}^{\text{ESS}} + \eta_{\text{ch}} \Delta t P_{e,i,t}^{\text{ch}} - \frac{1}{\eta_{\text{dis}}} \Delta t P_{e,i,t}^{\text{dis}} \\ E_{e,i}^{\min} \leq E_{e,i,t}^{\text{ESS}} \leq E_{e,i}^{\max} \end{cases} \quad (11)$$

式中:  $E_{e,i,t}^{\text{ESS}}$  为  $t$  时段节点  $i$  处储能的剩余容量;  $E_{e,i}^{\max}$  和  $E_{e,i}^{\min}$  分别为节点  $i$  处储能的最大、最小容量限制;  $\eta_{\text{ch}}$ 、 $\eta_{\text{dis}}$  分别为储能的充放电效率。

### (8) 电容器投切约束

为应对由于无功缺额引起的欠电压问题, 在网络重构过程中需要投切电容器组进行无功补偿, 应满足电容器投切约束, 即

$$\begin{cases} Q_{i,t}^{\text{CB}} = N_{i,t}^{\text{CB}} \times Q_{i,st}^{\text{CB}} \\ N_{i,t}^{\text{CB}} \leq N_i^{\text{CB,max}} \end{cases} \quad (12)$$

式中:  $Q_{i,t}^{\text{CB}}$  为  $t$  时段节点  $i$  处电容器的无功补偿容量;  $Q_{i,st}^{\text{CB}}$  表示投入单个电容器的无功补偿容量;  $N_{i,t}^{\text{CB}}$  为  $t$  时段节点  $i$  处投切的电容器数量;  $N_i^{\text{CB,max}}$  为节点  $i$  处可供投切的电容器总数。

### (9) 需求响应约束

在配电网中采用需求响应策略, 可以在降低负荷峰谷差的同时, 减少配电网运行的综合成本, 提高配电网运行的经济性和可靠性。考虑需求响应的负荷约束如式(13)—式(16)所示。

$$-\xi_{i,t} = \frac{\Delta P_{i,t}}{\Delta \rho_{i,t}} = \frac{P_{i,t}^{\text{cur}} - P_{i,t}}{\rho_{i,t}^{\text{cur}} - \rho_{i,t}} \quad (13)$$

$$\rho_{i,t}^{\text{cur}} = \begin{cases} \rho^{\text{peak}} & t \in T^{\text{peak}} \\ \rho^{\text{valley}} & t \in T^{\text{valley}} \end{cases} \quad (14)$$

$$\sum_{i=1}^{N_i} \sum_{t=1}^T P_{i,t}^{\text{cur}} = \sum_{i=1}^{N_i} \sum_{t=1}^T P_{i,t} \quad (15)$$

$$\rho_{i,t}^{\text{cur,min}} \leq \rho_{i,t}^{\text{cur}} \leq \rho_{i,t}^{\text{cur,max}} \quad (16)$$

式中:  $\xi_{i,t}$  为节点  $i$  在  $t$  时刻的电价弹性系数;  $\Delta P_{i,t}$  为节点  $i$  在  $t$  时刻实施需求响应前后的用电需求变化量;  $\Delta \rho_{i,t}$  为节点  $i$  在  $t$  时刻实施需求响应前后的电量变化量;  $\rho_{i,t}$  和  $\rho_{i,t}^{\text{cur}}$  分别为节点  $i$  在  $t$  时刻实施需求响应前后的电价;  $P_{i,t}$  和  $P_{i,t}^{\text{cur}}$  分别为节点  $i$  在  $t$  时刻实施需求响应前后的负荷量;  $\rho_{i,t}^{\text{cur,max}}$  和  $\rho_{i,t}^{\text{cur,min}}$  分别为节点  $i$  在  $t$  时刻实施需求响应后电价的上下限。

## 2 模型转化及求解

配电网重构模型中存在二次项、三角函数项, 属于非凸优化问题。本文通过引入中间变量的方法, 利用二阶锥松弛技术对网络重构模型进行转凸处理, 引入的中间变量如式(17)—式(21)所示。



元/kWh、谷时电价为 0.256 1 元/kWh，平时电价为 0.691 元/kWh，负荷弹性系数为 0.5。优化结果为：配电网断开线路  $L_{4-5}$ 、 $L_{9-10}$ 、 $L_{17-18}$ 、 $L_{28-29}$  和  $L_{8-21}$  的开关。图 3 为实施需求响应前后的负荷需求曲线。从图中可以看出，采用本文的需求响应策略之后，部分负荷从用电高峰时段(12:00—15:00, 19:00—23:00)转移到用电低谷时段(00:00—11:00, 16:00—18:00)，且进行需求响应前的负荷峰谷差为 0.77(标么值)，而进行需求响应后的负荷峰谷差降低至 0.57(标么值)。在配电网重构中计及需求响应措施的负荷峰谷差相比原始负荷峰谷差有一定的改善。

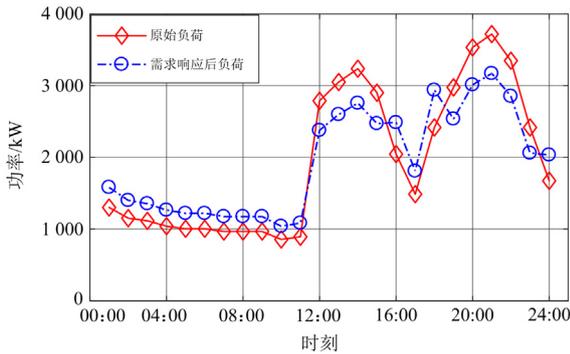


图 3 实施需求响应前后的负荷需求曲线

Fig. 3 Load demand curves before and after demand response

为了探究需求响应措施对配电网重构结果的影响，对以下两种运行策略进行对比分析：运行策略 1，不计及需求响应的配电网重构；运行策略 2，计及需求响应的配电网重构。不同运行策略下系统的综合运行成本对比如表 1 所示。

表 1 不同运行策略下的系统运行成本对比

Table 1 Comparison of system operating costs under different operating strategies

运行策略	总费用/元	弃风费用/元	弃光费用/元	网损费用/元	开关次数
1	942.45	77.62	0	884.83	5
2	463.32	0	0	463.32	4

从表 1 中可以看出，对比运行策略 1，运行策略 2 一天运行的网损费用降低 421.5 元，总费用降低 479.13 元。这是由于计及需求响应之后，系统的负荷峰谷差减小，导致了整体网损费用的降低。从表 1 中同时可以看出，运行策略 2 的弃风弃光费用为 0，运行策略 1 的弃风弃光费用为 77.62 元，这说明计及需求响应措施能够提升系统对清洁能源的消纳水平。

图 4 为计及需求响应前后对应的配电网重构的节点电压曲面图。以负荷低谷期某时刻(08:00)、负

荷高峰期某时刻(14:00)为例，探究需求响应措施对处于负荷高峰期以及负荷低谷期电能质量的影响。图 5 为 08:00 时计及需求响应前后配电网重构的节点电压曲线图，图 6 为 14:00 时计及需求响应前后配电网重构的节点电压曲线图。

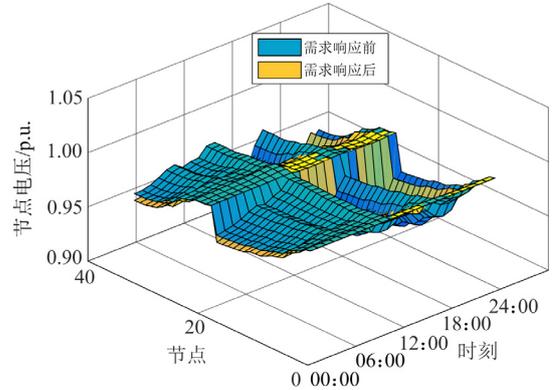


图 4 计及需求响应前后配电网重构节点电压曲面图

Fig. 4 Voltage surface of distribution network reconfiguration nodes before and after demand response

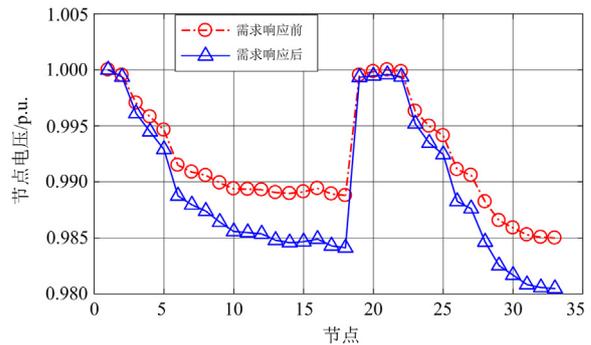


图 5 08:00 计及需求响应前后配电网重构节点电压曲线图

Fig. 5 Voltage curves of distribution network reconfiguration nodes before and after demand response at 08:00

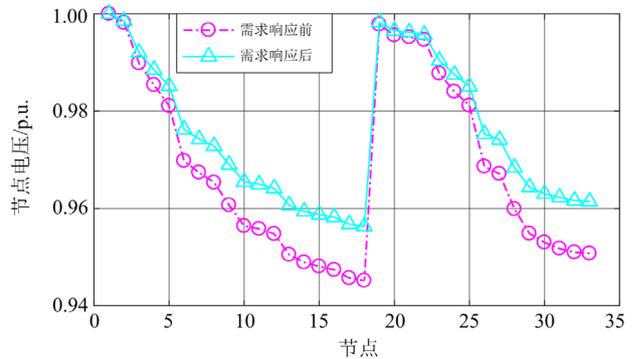


图 6 14:00 计及需求响应前后配电网重构节点电压曲线图

Fig. 6 Voltage curves of distribution network reconfiguration nodes before and after demand response at 14:00

从图 5 和图 6 可以看出, 在负荷低谷时刻(08:00), 考虑需求响应措施的配电网重构方案的整体电压值比未考虑需求响应措施时更低; 而在负荷高峰时刻(14:00), 考虑需求响应措施的配电网重构方案的整体电压值比未考虑需求响应措施时更高。这是由于需求响应削峰填谷的作用, 在负荷低谷时, 考虑需求响应措施使得系统总负荷增大, 因此系统整体电压值降低; 而在负荷高峰时, 考虑需求响应措施使得总负荷减小, 因此整体电压值升高。

上述结果说明, 在配电网重构中考虑需求响应措施后, 通过降低负荷峰谷差能够有效减少系统运行成本, 同时提升系统高峰时期的电压质量, 提升系统运行的经济性和安全性。

### 3.2 清洁能源渗透率对重构结果的影响

为了探究清洁能源不同渗透率对配电网的影响, 分别设置清洁能源渗透率为 20%、40%、60%、80%, 并计及需求响应, 对不同清洁能源渗透率下的配电网进行重构。不同渗透率下计及需求响应的配电网重构结果如表 2 所示。

表 2 不同清洁能源渗透率下的模型求解结果

Table 2 Model solving results for different clean energy penetration rates

清洁能源渗透率/%	总费用/元	弃风费用/元	弃光费用/元	网损费用/元	开关操作次数
20	653.29	0	0	653.29	5
40	457.51	0	0	457.51	4
60	463.32	0	0	463.32	4
80	957.72	69.43	0	888.29	4

从表 2 中可以看出, 当清洁能源渗透率从 20% 提升至 40% 时, 接入系统的清洁能源被配电网完全消纳, 使得一天之内的系统网损费用减少了 195.78 元。然而随着清洁能源渗透率从 40% 提升至 60% 时, 系统网损费用增加了 5.81 元, 这是因为随着清洁能源渗透率的升高, 系统以减少弃风弃光量为目标时, 会加剧系统内的负荷峰谷差, 增大线路传输功率, 使得系统网损有所增大。当清洁能源渗透率从 60% 提升至 80% 时, 系统的网损费用增加了 424.97 元, 同时产生了弃风费用 69.43 元, 导致系统的总费用增加 494.4 元, 这是因为系统大量消纳风光发电加剧了系统内的负荷峰谷差, 使得网损费用增加。同时由于系统安全运行约束, 使得系统难以消纳所有清洁能源, 出现了弃风弃光的现象。

图 7 为不同清洁能源渗透率下各节点各时段的电压曲面图, 图 8 为 08:00 不同清洁能源渗透率下

节点电压曲线图。从图 7 和图 8 中可以看出, 随着清洁能源渗透率的增加, 节点电压标幺值整体不断上升。然而当清洁能源渗透率达到 80% 时, 部分节点在某些时刻(如 08:00)会高于平衡节点电压(标幺值为 1)。

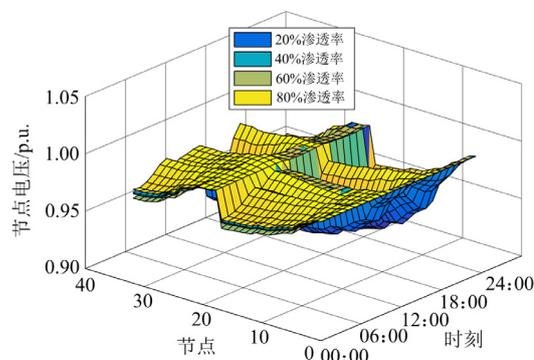


图 7 不同清洁能源渗透率下的节点电压曲面图

Fig. 7 Node voltage surfaces at different clean energy penetrations rates

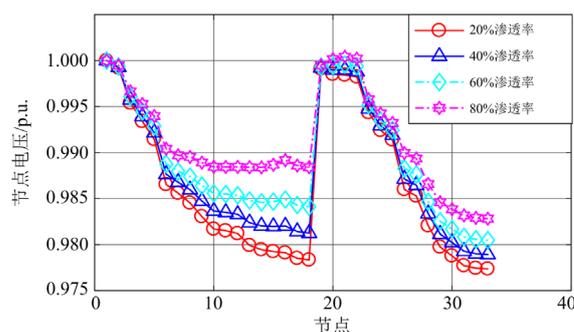


图 8 08:00 不同清洁能源渗透率下节点电压曲线图

Fig. 8 Node voltage curves at different clean energy penetration rates at 08:00

上述结果说明: 合适的清洁能源渗透率能够减少网络重构过程中系统的网损, 提升电压质量; 当清洁能源渗透率过高或者过低时, 都会增加系统运行成本, 降低电压质量。

## 4 结论

在高比例清洁能源接入下, 本文以综合考虑网损费用、弃风弃光费用、开关操作惩罚费用的成本最小为目标函数, 构建了计及需求响应的配电网重构模型。针对模型的非凸性, 引入中间变量并进行二阶锥松弛, 获得混合整数凸规划模型; 最后使用改进 IEEE 33 节点配电网进行算例仿真, 分析了需求响应措施和清洁能源渗透率对配电网重构结果的影响。

## 参考文献

- [1] 李扬, 韦钢, 马钰, 等. 含电动汽车和分布式电源的主动配电网动态重构[J]. 电力系统自动化, 2018, 42(5): 102-110.  
LI Yang, WEI Gang, MA Yu, et al. Dynamic reconfiguration of active distribution network considering electric vehicles and distributed generations[J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(5): 102-110.
- [2] ONLAM A, YODPHET D, CHATTHAWORN R, et al. Power loss minimization and voltage stability improvement in electrical distribution system via network reconfiguration and distributed generation placement using novel adaptive shuffled frogs leaping algorithm[J]. Energies, 2019, 12(3): 251-259.
- [3] 王一飞, 董新伟, 杨飞, 等. 基于配电网电压质量的分布式储能系统优化配置研究[J]. 热力发电, 2020, 49(8): 126-133.  
WANG Yifei, DONG Xinwei, YANG Fei, et al. Optimal configuration of distributed energy storage system based on voltage quality of distribution network[J]. Thermal Power Generation, 2020, 49(8): 126-133.
- [4] 孙立明, 杨博. 蓄电池/超导混合储能系统非线性鲁棒分数阶控制[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(22): 76-83.  
SUN Liming, YANG Bo. Nonlinear robust fractional-order control of battery/SMES hybrid energy storage systems[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(22): 76-83.
- [5] RAPOSO A, SILVA M, RODRIGUES A B. Robust meter placement for state estimation considering distribution network reconfiguration for annual energy loss reduction[J]. Electric Power Systems Research, 2020, 182.
- [6] CIVANLAR S, GRAINGER J J, YIN H, et al. Distribution feeder reconfiguration for loss reduction[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1988, 3(3): 1217-1223.
- [7] 陈岩, 靳伟, 王文宾, 等. 兼顾区域自律和消纳品质的配电网新能源消纳能力分析[J/OL]. 中国电力: 1-12.[2020-06-10].<https://kns.cnki.net/kcms/detail/11.3265.TM.20200610.1049.004.html>.  
CHEN Yan, JIN Wei, WANG Wenbin, et al. A method for analyzing the absorption capacity of new energy in power distribution network with consideration of regional self-discipline and absorption quality[J/OL]. Electric Power, 1-12. [2020-06-10].<https://kns.cnki.net/kcms/detail/11.3265.TM.20200610.1049.004.html>.
- [8] RAUL V M, JAKSON P B, RAONI F S, et al. Electric distribution network reconfiguration optimized for PV distributed generation and energy storage[J]. Electric Power Systems Research, 2020, 184.
- [9] 刘星, 崔双喜. 孤岛与重构相配合的配电网故障恢复策略[J]. 华电技术, 2020, 42(1): 29-34.  
LIU Xing, CUI Shuangxi. Fault recovery strategy for distribution network with isolated island and reconfiguration[J]. Huadian Technology, 2020, 42(1): 29-34.
- [10] 王艺, 王宾, 刘阳, 等. 计及分布式电源动态行为的配电网重构优化策略[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(24): 164-172.  
WANG Yi, WANG Bin, LIU Yang, et al. Optimization strategy for distribution network reconfiguration considering the dynamic behavior of DGs[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(24): 164-172.
- [11] 潘本仁, 王和春, 张妍, 等. 含分布式电源的主动配电网重构策略研究[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(15): 102-107.  
PAN Benren, WANG Hechun, ZHANG Yan, et al. Study on an active distribution network reconstruction strategy with distributed power supply[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(15): 102-107.
- [12] 郑能, 胡瑞馨, 丁晓群, 等. 考虑多种类型的分布式电源和网络重构的配电网无功优化[J]. 智慧电力, 2019, 47(3): 90-96.  
ZHENG Neng, HU Ruixin, DING Xiaoqun, et al. Reactive power optimization of distribution network considering multiple types of distributed generations and network reconfiguration[J]. Smart Power, 2019, 47(3): 90-96.
- [13] 孙惠娟, 彭春华, 袁义生. 综合开关次数分析的配电网多目标动态重构[J]. 电力自动化设备, 2014, 34(9): 41-46.  
SUN Huijuan, PENG Chunhua, YUAN Yisheng. Multi-objective dynamic distribution network reconfiguration considering switching frequency[J]. Electric Power Automation Equipment, 2014, 34(9): 41-46.
- [14] 金亦舟, 张莉萍, 牛启帆. 计及随机模糊不确定性的含风电配电网重构[J]. 电力系统及其自动化学报, 2020, 32(7): 67-72.  
JIN Yizhou, ZHANG Liping, NIU Qifan. Distribution

- network reconfiguration with optimal allocation of distributed generation[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2020, 32(7): 67-72.
- [15] 孙孔明, 陈青, 赵普. 考虑环网检测的配电网拓扑重构遗传算法[J]. 电力系统自动化, 2018, 42(11): 64-71.  
SUN Kongming, CHEN Qing, ZHAO Pu. Genetic algorithm with mesh check for distribution network topology reconfiguration[J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(11): 64-71.
- [16] 许立雄, 吕林, 刘俊勇. 基于改进粒子群优化算法的配电网重构[J]. 电力系统自动化, 2006, 30(7): 27-30.  
XU Lixiong, LÜ Lin, LIU Junyong. Modified particle swarm optimization for reconfiguration of distribution network[J]. Automation of Electric Power Systems, 2006, 30(7): 27-30.
- [17] 李猛, 王利利, 刘向实, 等. 基于门当户对遗传算法的配电网多目标主动重构研究[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(7): 30-38.  
LI Meng, WANG Lili, LIU Xiangshi, et al. Multi-objective active reconfiguration of distribution network based on the "properly matched marriage" genetic algorithm[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(7): 30-38.
- [18] 李振坤, 陈星莺, 余昆, 等. 配电网重构的混合粒子群算法[J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(31): 35-41.  
LI Zhenkun, CHEN Xingying, YU Kun, et al. Hybrid particle swarm optimization for distribution network reconfiguration[J]. Proceedings of the CSEE, 2008, 28(31): 35-41.
- [19] 江钧, 成乐祥, 孙国强, 等. 考虑安全域的配电网重构二阶锥双层规划模型[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(4): 9-16.  
JIANG Jun, CHENG Lexiang, SUN Guoqiang, et al. Distribution network reconfiguration based on second order cone bi-level programming considering security distance[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(4): 9-16.
- [20] 徐俊俊, 吴在军, 周力, 等. 考虑分布式电源不确定性的配电网鲁棒动态重构[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(16): 4715-4725.  
XU Junjun, WU Zaijun, ZHOU Li, et al. Robust dynamic reconfiguration for distribution networks considering uncertainty of distributed generations[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(16): 4715-4725.
- [21] 汪芳宗, 王兆丰. 基于混合整数二次锥规划方法的含分布式电源配电网优化重构方法[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(24): 24-30.  
WANG Fangzong, WANG Zhaofeng. An optimum reconfiguration method for distribution networks with DG based on mixed integer second-order cone programming[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(24): 24-30.
- [22] 葛鹏江, 张树永, 董晓晶, 等. 基于鲁棒优化的配网重构二阶锥规划模型[J]. 电力科学与技术学报, 2018, 33(4): 50-57.  
GE Pengjiang, ZHANG Shuyong, DONG Xiaojing, et al. Distribution network reconfiguration based on robust optimization[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2018, 33(4): 50-57.
- [23] 李洪美, 崔翰韬, 万秋兰. 考虑电动汽车充电策略的配网重构二阶锥规划模型[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(18): 4674-4681.  
LI Hongmei, CUI Hantao, WAN Qiulan. Distribution network reconfiguration based on second-order conic programming considering EV charging strategy[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(18): 4674-4681.
- [24] BARAN M E, WU F F. Network reconfiguration in distribution systems for loss reduction and load balancing[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1989, 4(2): 1401-1407.

收稿日期: 2021-03-18; 修回日期: 2021-06-15

作者简介:

黄鸣宇(1980—), 男, 通信作者, 硕士, 教授级高工, 从事智能配电网运行、配网馈线自动化、新能源等研究; E-mail: huangmingyu332@163.com

张庆平(1989—), 男, 硕士, 从事配电网技术及高压外绝缘防护技术研究; E-mail: 573630192@qq.com

张沈习(1988—), 男, 博士, 副研究员, 硕士生导师, 从事新能源电力系统与综合能源系统规划、运行等研究。 E-mail: willzxs@sjtu.edu.cn

(编辑 张爱琴)