

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.230694

# 考虑含储能的三端智能软开关与需求侧响应的 主动配电网有功无功协调优化

米阳<sup>1</sup>, 申杰<sup>1</sup>, 卢长坤<sup>1</sup>, 孟凡斌<sup>2</sup>, 南钰<sup>2</sup>

(1. 上海电力大学电气工程学院, 上海 200090; 2. 国网河南省电力公司开封供电公司, 河南 开封 475000)

**摘要:** 针对分布式电源(distributed generation, DG)大规模并网导致的配电网电压越限、网络损耗增加和弃风弃光等问题, 提出一种考虑含储能(energy storage system, ESS)的三端智能软开关(soft open point, SOP)与需求侧响应(demand response, DR)的主动配电网(active distribution network, ADN)有功无功协调优化策略。首先, 计及可再生能源出力的不确定性, 基于条件生成对抗网络(conditional generative adversarial networks, CGAN)生成日前场景。然后, 对含 ESS 的三端 SOP 与 DR 进行建模, 并将其与 DG 和传统无功补偿设备进行协调优化。构建以网络损耗最小、电压偏差最小、弃风弃光量最小、用户舒适度与用户经济度最大为优化目标的数学模型。进而转化为混合整数二阶锥规划模型, 并利用 GUROBI 进行求解。最后, 在改进的 IEEE 33 和 IEEE 69 节点配电系统中进行仿真验证。结果表明, 计及风光出力的不确定, 所提优化策略在兼顾用户舒适度和用户经济度的同时提高了配电网运行的经济性和可靠性。

**关键词:** 条件生成对抗网络; 含储能的三端智能软开关; 需求侧响应; 分布式电源; 主动配电网

## Active and reactive power coordination optimization of an active distribution network considering a three-terminal soft open point with energy storage and demand response

MI Yang<sup>1</sup>, SHEN Jie<sup>1</sup>, LU Changkun<sup>1</sup>, MENG Fanbin<sup>2</sup>, NAN Yu<sup>2</sup>

(1. College of Electrical Engineering, Shanghai University of Electric Power, Shanghai 200090, China;

2. Kaifeng Power Supply Company, State Grid Henan Electric Power Company, Kaifeng 475000, China)

**Abstract:** There are problems of distribution network voltage over-limit, increased network loss and curtailment of wind and solar power caused by a distributed generation (DG) connected to the grid. Thus an active and reactive power coordinated optimization method for an active distribution network is proposed. It considers demand response (DR) and three-terminal soft open point (SOP) with energy storage system (ESS). First, considering the uncertainty of renewable energy output, day-ahead scenarios are generated based on conditional generative adversarial networks (CGAN). Then, DR and a three-terminal SOP with ESS are modeled and coordinated with the DG and traditional reactive power compensation equipment. A mathematical model is constructed with the optimization objectives of minimum network loss, minimum voltage deviation, minimum curtailment of wind and solar power, and maximum user comfort and user economy. After that, it is transformed into a mixed integer second-order cone programming model and analyzed by GUROBI. Finally, simulation is carried out on an improved IEEE 33-node and IEEE 69-node distribution system. The results show that the proposed optimization method, which takes into account the uncertainty of wind and solar power, improves the economy and reliability of distribution network operation while giving consideration to the comfort and economy of users.

This work is supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 61873159).

**Key words:** conditional generative adversarial networks; three-terminal SOP with ESS; demand response; distributed generation; active distribution network

**基金项目:** 国家自然科学基金项目资助(61873159); 国网河南省电力公司科技项目资助(521790230001); 新型电力系统运行与控制全国重点实验室项目资助(SKLD22KM19)



## 0 引言

近年来,在双碳目标的影响下,配电网中光伏、风电等可再生能源的渗透率逐年提高<sup>[1]</sup>。然而分布式电源(distributed generation, DG)出力具有典型的随机性和间歇性等特点<sup>[2]</sup>,高比例 DG 接入配电网会带来双向潮流、电压越限和功率分布不均匀等问题,进而导致配电网的网络损耗增加、弃风弃光严重和运行可靠性降低<sup>[3-6]</sup>。因此,亟需优化配电网的运行策略来应对 DG 出力的不确定性,提升配电网运行的经济性和可靠性。

场景分析法可以用来分析 DG 出力不确定的问题<sup>[7-8]</sup>,它能根据不确定变量的概率特征,将不确定性因素转变成多个确定性场景来描述可再生能源出力的不确定性。文献[9]考虑风光出力的不确定性与时空相关性,采用数据驱动算法构建风光出力不确定集合,建立微网数据驱动鲁棒调度模型,提出一种基于极限场景的改进列约束生成算法求解微网鲁棒调度问题。文献[10]基于高斯混合模型描述了可再生能源出力不规则和多峰的分布特征,兼顾了可再生能源间的相关性。但是现有的数学模型仅考虑了风光出力的少数特征,难以全面描述可再生能源出力的不确定性。而条件生成对抗网络(conditional generative adversarial networks, CGAN)无须对数据服从的分布进行假定,能直接从历史数据中学习数据分布并生成新的数据样本,为 DG 出力建模提供了解决方案。文献[11]基于深度长短期记忆的循环神经网络构建生成对抗网络的生成器和判别器,使模型更适用于复杂综合能源负荷数据生成。文献[12]采用改进的条件深度卷积生成对抗网络学习历史数据分布,得到风光联合出力曲线以刻画 DG 出力的不确定性。

主动配电网(active distribution network, ADN)为新型电力系统的发展提供了新的优化手段和方法。传统的 ADN 通过调节有载调压变压器(on-load tap changer, OLTC)分接头档位、电容器组(capacitor bank, CB)投切组数和 DG 出力等措施来改善配电网的电压质量和潮流分布<sup>[13]</sup>,但是随着 ADN 实时运行的精度不断提高,传统的优化手段难以满足需求。智能软开关(soft open point, SOP)与需求侧响应(demand response, DR)为 ADN 提供了新的优化措施。

SOP 是一种能够替代传统联络开关的新型电力电子装置,在优化电网运行和提高电网韧性中得到了广泛应用。SOP 的引入改变了传统配电网闭环设计、开环运行的供电方式,极大地提高了配电网控制的实时性与快速性<sup>[14]</sup>。与传统联络开关相比, SOP

能够连续、准确地控制有功功率在不同馈线之间传递,均衡馈线之间的潮流,同时提供一定的无功支撑,改善配电网的电能质量<sup>[15]</sup>。文献[16]将 SOP 和传统无功补偿装置协调配合进行电压控制,提高配电网的供电能力和运行水平。文献[17]提出一种考虑越限风险的主动配电网中可再生 DG、SOP、储能(energy storage system, ESS)的两阶段协调规划方法,能够有效地提高系统运行效率、增强灵活性、降低运行安全风险及经济成本。文献[18]采用模型预测控制方法对含有 SOP 的 ADN 进行电压优化,实现了对配电网电压的快速、实时控制,解决了节点功率快速波动的难题,提高了电能质量。但上述文献均是研究两端 SOP 在配电网中的应用,未能进一步体现多端 SOP 在提升配电网功率传输能力和运行可靠性方面的优势。并且多端 SOP 只能实现配电网在空间层面的优化调度,未能在时间层面上进一步提高其性能,而多端 SOP 与储能装置的集成为此类问题提供了解决方案<sup>[19]</sup>。

由于 ADN 的高度复杂性和运行的多态性,仅通过 SOP 从网侧提升配电网的运行能力是不够的,需要从需求侧进一步开发其调节能力,丰富配网的调节手段。DR 是通过价格信号或激励机制等手段来引导用户调整原来的用电安排,削减或转移某时段的用电负荷,提升源侧和需求侧之间的匹配度。文献[20]在多时间尺度源荷协调调度策略中考虑了 DR,充分发挥需求侧潜力,不仅提升了配电网运行的经济性,还促进了可再生能源消纳。文献[21]将 DR 和电动汽车考虑进 ADN 的经济调度中。文献[22]考虑了价格型 DR 下的最优经济调度,在减小负荷峰谷差和促进可再生能源消纳的同时,降低用户的购电成本。上述文献虽然考虑了 DR,但是采用的模型过于简单,鉴于 DR 的复杂性,需要对其进行精细化建模以更加符合实际情况。

综上所述,本文提出了一种考虑含 ESS 的三端 SOP 和 DR 的 ADN 有功无功协调优化策略。利用 CGAN 生成日前场景,描述风光出力的不确定性。将含 ESS 的三端 SOP、DR 和传统无功补偿设备协同优化,在兼顾用户舒适度和用户经济度的同时,减小网络损耗和电压偏差,促进可再生能源消纳,实现配电网的经济安全运行。通过二阶锥松弛将原模型转换为混合整数二阶锥规划模型<sup>[23]</sup>,并在 YALMIP 平台上调用 GUROBI 求解器进行求解。

## 1 基于条件生成对抗网络的前场景生成

生成对抗网络(generative adversarial networks, GAN)是一种无监督学习模型,被广泛应用在无监督

学习和半监督学习领域。它由两个神经网络组成,一个是学习输入数据分布并生成新数据的生成器  $G$ ,另一个是用于区分真实数据和生成数据的鉴别器  $D$ <sup>[24-25]</sup>。生成器与鉴别器相互协作又相互竞争,通过博弈来使生成的样本更加贴合真实情况。CGAN 是对原始 GAN 的一个扩展<sup>[26]</sup>。与 GAN 的结构相比,CGAN 在生成器和鉴别器的输入中均加入了条件值的输入,能够更加精确地生成符合对应条件的样本<sup>[27]</sup>。CGAN 的网络结构如图 1 所示。

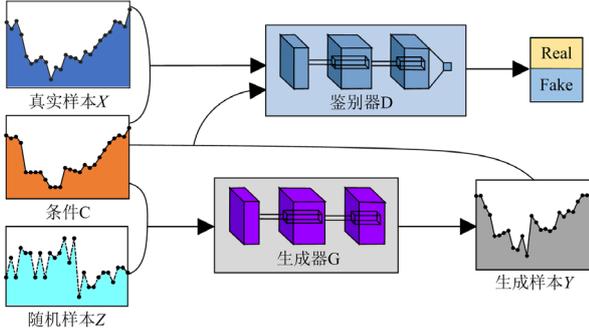


图 1 CGAN 的基本网络结构

Fig. 1 Basic network structure of CGAN

根据国家的并网准则,可再生能源电站需提前一天向配电网调度部门上报次日的风/光出力预测曲线。将可再生能源电站的历史实测数据及其对应的日前预测数据作为 CGAN 网络结构的训练样本集。其中,将历史实测数据和日前预测数据分别作为真实样本和条件进行训练。通过训练,生成器能够学习到满足条件的随机样本与真实样本之间的映射关系,便可根据日前预测曲线获取风/光出力的分布情况,描述风/光出力的不确定性。

## 2 含储能的三端 SOP 与 DR 数学模型

### 2.1 含储能的三端 SOP 的数学模型

三端 SOP 是一种全控型电力电子装置,在其端口交汇处安装有直流大电容,不仅能够隔离故障端口,还可以提供直流电压支撑和保证直流功率传输平衡。它在平衡馈线之间的有功功率时,能够提供一定的无功支撑<sup>[28]</sup>。含 ESS 的三端 SOP 则是在传统三端 SOP 拓扑结构的基础上,在直流大电容侧再并联 1 个 ESS,具体结构如图 2 所示。三端 SOP 含有 3 个变流器(voltage source converter, VSC),在正常运行模式下,通常选取  $PQ-PQ-V_{dc}Q$  控制作为 SOP 的控制模式。当 DG 大规模接入 ADN 时,SOP 为了均衡负载和优化潮流,会在馈线之间进行大量有功功率的交互,因此,在优化运行中需要考虑功率交互带来的损耗<sup>[29]</sup>。

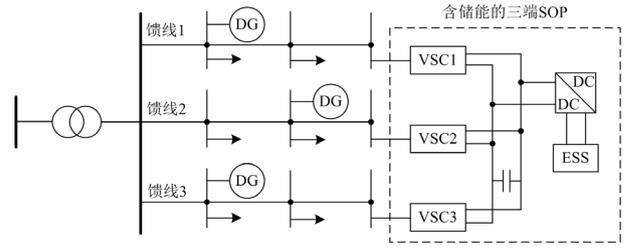


图 2 含储能的三端 SOP 结构图

Fig. 2 Structure of three-terminal SOP with ESS

在配电网运行时,各 VSC 需满足其容量约束,如式(1)所示。

$$\sqrt{P_{SOP,i,t}^2 + Q_{SOP,i,t}^2} \leq S_{SOP,i,max} \quad i=1,2,3 \quad (1)$$

式中:  $P_{SOP,i,t}$  和  $Q_{SOP,i,t}$  分别为  $t$  时段三端 SOP 第  $i$  个端口输出的有功功率和无功功率;  $S_{SOP,i,max}$  为三端 SOP 第  $i$  个端口 VSC 的最大容量。

根据实际运行方式,含 ESS 的三端 SOP 所有端口的有功功率、有功损耗和 ESS 的充放电功率之和为零,其端口的功率关系可描述为

$$\sum_{i=1}^3 P_{SOP,i,t} + \sum_{i=1}^3 P_{loss,i,t} + P_{ESS,t} = 0 \quad (2)$$

式中:  $P_{loss,i,t}$  为  $t$  时段三端 SOP 第  $i$  个端口的有功损耗;  $P_{ESS,t}$  为  $t$  时段 ESS 的充放电功率。

考虑到 SOP 本身存在一定的有功功率损耗,与各个端口输出的有功功率成正比,可近似描述为

$$P_{loss,i,t} = m_{loss} |P_{SOP,i,t}|, \quad i=1,2,3 \quad (3)$$

式中,  $m_{loss}$  为三端 SOP 各个端口的有功功率损耗系数。

### 2.2 DR 的数学模型

在 DG 大规模接入的情况下,DR 能够通过峰谷电价的形式引导用户的用电行为,将负荷高峰时段的部分负荷转移到负荷低谷时;或者通过和用户签订合同,根据削减或转移负荷量的大小给予用户相应的补偿,达到削峰填谷、平衡负荷的目的,从而降低网络损耗,提升配电网运行的经济性<sup>[30]</sup>。本文的负荷模型考虑了居民负荷、商业负荷和工业负荷 3 类典型负荷,针对工业负荷,采用可削减负荷的调控手段,针对商业和居民负荷,采用可转移负荷的调控手段<sup>[31]</sup>。

#### 2.2.1 可中断负荷

可中断负荷约束主要有可中断容量、中断次数、最大允许中断时长和两次中断最小时间间隔等。

$$0 \leq P_{cut,i,t} \leq P_{cut,max} L_{cut,i,t} \quad (4)$$

$$\sum_{t=1}^T L_{\text{cut},i,t} \leq N_{\text{cut},i,\text{max}} \quad (5)$$

$$\sum_{t=s}^{s+T_{\text{cut},\text{max}}-1} L_{\text{cut},i,t} \leq T_{\text{cut},\text{max}} \quad s=1,2,\dots,T-T_{\text{cut},\text{max}} \quad (6)$$

$$\begin{cases} \sum_{t=s}^{s+t_{\text{cut},\text{min}}-1} (1-L_{\text{cut},i,t}) \geq t_{\text{cut},\text{min}} (L_{\text{cut},i,s-1} - L_{\text{cut},i,s}), \\ s=1,2,\dots,T-t_{\text{cut},\text{min}}+1 \\ \sum_{t=s}^T [(1-L_{\text{cut},i,t}) - (L_{\text{cut},i,s-1} - L_{\text{cut},i,s})] \geq 0, \\ s=T-t_{\text{cut},\text{min}}+2,\dots,T \end{cases} \quad (7)$$

式中:  $P_{\text{cut},i,t}$  为  $t$  时段节点  $i$  削减的有功负荷量;  $P_{\text{cut},\text{max}}$  为可中断负荷的最大中断量;  $L_{\text{cut},i,t}$  为  $t$  时段节点  $i$  削减负荷的状态变量, 等于 0 表示不削减, 等于 1 表示削减;  $T$  为调度周期;  $N_{\text{cut},i,\text{max}}$  为节点  $i$  可中断负荷的最大中断次数;  $T_{\text{cut},\text{max}}$  为可中断负荷的最大中断持续时间;  $t_{\text{cut},\text{min}}$  为可中断负荷的最小中断时间间隔。

### 2.2.2 可转移负荷

$$0 \leq P_{\text{trin},i,t} \leq P_{\text{trin},\text{max}} L_{\text{tr},i,t} \quad (8)$$

$$0 \leq P_{\text{trout},i,t} \leq P_{\text{trout},\text{max}} (1-L_{\text{tr},i,t}) \quad (9)$$

$$\sum_{t=1}^T P_{\text{trin},i,t} = \sum_{t=1}^T P_{\text{trout},i,t} \quad (10)$$

式中:  $P_{\text{trin},i,t}$  和  $P_{\text{trout},i,t}$  分别为  $t$  时段节点  $i$  转入和转出的有功负荷;  $P_{\text{trin},\text{max}}$  和  $P_{\text{trout},\text{max}}$  分别为可转移负荷的最大转入量和转出量;  $L_{\text{tr},i,t}$  为  $t$  时段节点  $i$  处可转移负荷的状态变量, 等于 0 表示无负荷转入, 等于 1 表示有负荷转入。

### 2.2.3 需求侧响应调度的总负荷

DR 调度的总负荷由可削减负荷和可转移负荷两部分组成, 可描述为

$$P_{\text{DR},i,t} = P_{\text{trin},i,t} - P_{\text{trout},i,t} - P_{\text{cut},i,t} \quad (11)$$

$$Q_{\text{DR},i,t} = P_{\text{DR},i,t} \tan \phi \quad (12)$$

式中:  $P_{\text{DR},i,t}$ 、 $Q_{\text{DR},i,t}$  分别为  $t$  时段节点  $i$  参与 DR 调度的有功负荷和无功负荷;  $\phi$  为参与 DR 负荷的功率因数角。

## 3 主动配电网有功无功协调优化模型

### 3.1 目标函数

为了提高配电网运行的经济性和可靠性, 本文在高比例新能源接入的情况下提出了考虑含 ESS 的三端 SOP 与 DR 的 ADN 有功无功协调优化模型。该模型考虑了三端 SOP 功率调节、OLTC 挡位调节、

DG 出力、ESS 充放电、CB 投切、静止无功补偿器 (static var compensator, SVC) 出力和 DR 调度等控制变量, 以网络损耗最小、电压偏差最小、弃风弃光量最小、用户满意度和用户舒适度最大为目标函数, 构建如下模型。

$$F = \min \left( \omega_1 f_{\text{loss}} + \omega_2 f_{\text{vol}} + \omega_3 f_{\text{aban}} + \omega_4 ((1-f_{\text{con}}) + (1-f_{\text{eco}})) \right) \quad (13)$$

$$f_{\text{loss}} = \sum_{t=1}^T \sum_{ij \in E} r_{ij} I_{ij,t}^2 \quad (14)$$

$$f_{\text{vol}} = \sum_{t=1}^T \sum_{i \in \Omega} |U_{i,t} - U_{i,t}^{\text{rated}}| \quad (15)$$

$$f_{\text{aban}} = \sum_{t=1}^T \sum_{i \in \Omega_{\text{WT}}} (P_{\text{WTmax},i,t} - P_{\text{WT},i,t}) + \sum_{t=1}^T \sum_{i \in \Omega_{\text{PV}}} (P_{\text{PVmax},i,t} - P_{\text{PV},i,t}) \quad (16)$$

$$f_{\text{con}} = 1 - \frac{\sum_{t=1}^T \sum_{i \in \Omega_{\text{DR}}} (P_{\text{trin},i,t} + P_{\text{trout},i,t} + P_{\text{cut},i,t})}{\sum_{t=1}^T \sum_{i \in \Omega_{\text{DR}}} P_{\text{Load},i,t}} \quad (17)$$

$$f_{\text{eco}} = 1 - \frac{\sum_{t=1}^T \sum_{i \in \Omega_{\text{DR}}} C_t (P_{\text{Load},i,t} + P_{\text{DR},i,t})}{\sum_{t=1}^T \sum_{i \in \Omega_{\text{DR}}} C_t P_{\text{Load},i,t}} \quad (18)$$

式中:  $\omega_1$ 、 $\omega_2$ 、 $\omega_3$ 、 $\omega_4$  均为权重系数;  $f_{\text{loss}}$ 、 $f_{\text{vol}}$ 、 $f_{\text{aban}}$ 、 $f_{\text{con}}$ 、 $f_{\text{eco}}$  分别为配电网的网络损耗、电压偏差、弃风弃光量、用户舒适度和用户经济度;  $E$  为配电网中所有支路集合;  $\Omega$  为配电网中所有节点集合;  $\Omega_{\text{WT}}$ 、 $\Omega_{\text{PV}}$  分别为配电网中接入风电和光伏的节点集合;  $\Omega_{\text{DR}}$  为配电网中参与 DR 的节点集合;  $r_{ij}$  为支路  $ij$  的等效阻抗;  $I_{ij,t}$  为  $t$  时刻流经支路  $ij$  的电流幅值;  $U_{i,t}$  和  $U_{i,t}^{\text{rated}}$  分别为  $t$  时刻节点  $i$  的电压幅值和额定电压幅值;  $P_{\text{WTmax},i,t}$ 、 $P_{\text{PVmax},i,t}$  分别为  $t$  时刻节点  $i$  处风电和光伏发出的最大有功功率;  $P_{\text{WT},i,t}$ 、 $P_{\text{PV},i,t}$  分别为  $t$  时刻节点  $i$  处风电和光伏接入电网的实际功率;  $C_t$  为  $t$  时刻的电网电价;  $P_{\text{Load},i,t}$  为  $t$  时刻节点  $i$  的有功负荷。

### 3.2 约束条件

#### 3.2.1 潮流约束

ADN 的动态潮流约束为<sup>[14]</sup>

$$P_{i,t} = G_{ii} U_{i,t}^2 + \sum_{j \in \Omega} U_{i,t} U_{j,t} (G_{ij} \cos \theta_{ij,t} + B_{ij} \sin \theta_{ij,t}) = P_{\text{grid},i,t} + P_{\text{DG},i,t} + P_{\text{SOP},i,t} - P_{\text{Load},i,t} - P_{\text{DR},i,t} \quad (19)$$

$$Q_{i,t} = -B_{ii}U_{i,t}^2 - \sum_{j \in \Omega} U_{i,t}U_{j,t}(B_{ij} \cos \theta_{ij,t} - G_{ij} \sin \theta_{ij,t}) =$$

$$Q_{\text{grid},i,t} + Q_{\text{DG},i,t} + Q_{\text{CB},i,t} + Q_{\text{SVC},i,t} + Q_{\text{SOP},i,t} -$$

$$Q_{\text{Load},i,t} - Q_{\text{DR},i,t} \quad (20)$$

式中： $\Omega$ 为节点*i*相邻节点的集合； $P_{i,t}$ 和 $Q_{i,t}$ 分别为*t*时刻节点*i*注入的有功功率和无功功率； $G_{ii}$ 、 $B_{ii}$ 、 $G_{ij}$ 、 $B_{ij}$ 分别为节点导纳矩阵中的自电导、自电纳、互电导和互电纳； $\theta_{ij,t}$ 为*t*时刻节点*i*与节点*j*之间的电压相角差； $P_{\text{grid},i,t}$ 、 $P_{\text{DG},i,t}$ 和 $Q_{\text{grid},i,t}$ 、 $Q_{\text{DG},i,t}$ 分别为*t*时刻节点*i*从上级电网和 DG 获取的有功功率和无功功率； $Q_{\text{Load},i,t}$ 为*t*时刻节点*i*处的无功负荷； $Q_{\text{CB},i,t}$ 、 $Q_{\text{SVC},i,t}$ 分别为*t*时刻节点*i*处 CB 和 SVC 注入的无功功率。

节点电压约束为

$$U_{i,\min} \leq U_{i,t} \leq U_{i,\max} \quad (21)$$

式中， $U_{i,\max}$ 、 $U_{i,\min}$ 分别为节点*i*的电压幅值上下限。

支路电流约束为

$$\begin{cases} I_{ij,t}^2 = (G_{ij}^2 + B_{ij}^2)(U_{i,t}^2 + U_{j,t}^2 - 2U_{i,t}U_{j,t} \cos \theta_{ij,t}) \\ I_{ij,t}^2 \leq I_{ij,\max}^2 \end{cases} \quad (22)$$

式中， $I_{ij,\max}$ 为支路*ij*上的电流幅值上限。

### 3.2.2 分布式电源约束

$$\begin{cases} 0 \leq P_{\text{PV},i,t} \leq P_{\text{PV},\max,i,t} \\ -Q_{\text{PV},\max,i,t} \leq Q_{\text{PV},i,t} \leq Q_{\text{PV},\max,i,t} \\ Q_{\text{PV},\max,i,t} = P_{\text{PV},i,t} \tan \varphi_{\text{PV}} \end{cases} \quad i \in \Omega_{\text{PV}} \quad (23)$$

$$\begin{cases} 0 \leq P_{\text{WT},i,t} \leq P_{\text{WT},\max,i,t} \\ -Q_{\text{WT},\max,i,t} \leq Q_{\text{WT},i,t} \leq Q_{\text{WT},\max,i,t} \\ Q_{\text{WT},\max,i,t} = P_{\text{WT},i,t} \tan \varphi_{\text{WT}} \end{cases} \quad i \in \Omega_{\text{WT}} \quad (24)$$

$$\begin{cases} P_{\text{DG},i,t} = P_{\text{PV},i,t} + P_{\text{WT},i,t} \\ Q_{\text{DG},i,t} = Q_{\text{PV},i,t} + Q_{\text{WT},i,t} \end{cases} \quad (25)$$

式中： $Q_{\text{PV},i,t}$ 、 $Q_{\text{WT},i,t}$ 分别为*t*时刻节点*i*上光伏和风电接入电网的实际无功功率； $Q_{\text{PV},\max,i,t}$ 、 $Q_{\text{WT},\max,i,t}$ 分别为*t*时刻节点*i*上光伏和风电发出的最大无功功率； $\varphi_{\text{PV}}$ 、 $\varphi_{\text{WT}}$ 分别为光伏和风电的最小功率因数角。

### 3.2.3 有载调压变压器约束

通过 OLTC 可以有效调节配电网变电站母线节点电压，改善配电网的电压分布情况，可描述<sup>[32]</sup>为

$$\begin{cases} U_{1,t}^2 = U_{0,t}^2 R_{\text{OLTC},t} \\ R_{\text{OLTC},\min} \leq R_{\text{OLTC},t} \leq R_{\text{OLTC},\max} \\ R_{\text{OLTC},t} = R_{\text{OLTC},\min} + \sum_s r_{\text{OLTC},s} \sigma_{\text{OLTC},s,t} \end{cases} \quad (26)$$

式中： $U_{0,t}$ 、 $U_{1,t}$ 分别为*t*时刻 OLTC 左侧、右侧节点的电压幅值； $R_{\text{OLTC},t}$ 为*t*时刻 OLTC 变比的平方； $R_{\text{OLTC},\max}$ 、 $R_{\text{OLTC},\min}$ 分别为 OLTC 变比平方的上下限； $r_{\text{OLTC},s}$ 为 OLTC 挡位*s*与挡位*s*-1变比平方的差值，表示相邻调节增量； $\sigma_{\text{OLTC},s,t}$ 为 0-1 标识符。

一般情况下配电网对 OLTC 挡位的调节范围和调节次数也有一定的限制，约束条件为

$$\sigma_{\text{OLTC},s_{\text{ROLTC}},t} \leq \sigma_{\text{OLTC},2,t} \leq \sigma_{\text{OLTC},1,t} \quad (27)$$

$$\begin{cases} \delta_{\text{OLTCIN},t} + \delta_{\text{OLTCDE},t} \leq 1 \\ \sum_s \sigma_{\text{OLTC},s,t} - \sum_s \sigma_{\text{OLTC},s,t-1} \geq \delta_{\text{OLTCIN},t} - \delta_{\text{OLTCDE},t} S_{\text{ROLTC}} \\ \sum_s \sigma_{\text{OLTC},s,t} - \sum_s \sigma_{\text{OLTC},s,t-1} \leq \delta_{\text{OLTCIN},t} S_{\text{ROLTC}} - \delta_{\text{OLTCDE},t} \\ \sum_{t=1}^T (\delta_{\text{OLTCIN},t} + \delta_{\text{OLTCDE},t}) \leq N_{\text{OLTC},\max} \end{cases} \quad (28)$$

式中： $\delta_{\text{OLTCIN},t}$ 、 $\delta_{\text{OLTCDE},t}$ 为*t*时刻 OLTC 挡位调节变化的 0-1 标识符，当*t*时刻 OLTC 挡位上调则 $\delta_{\text{OLTCIN},t}$ 为 1， $\delta_{\text{OLTCDE},t}$ 为 0，反之同理； $S_{\text{ROLTC}}$ 为 OLTC 单次调节的最大挡位； $N_{\text{OLTC},\max}$ 为 OLTC 在*T*时段内的最大调节次数。

### 3.2.4 电容器组约束

$$Q_{\text{CB},i,t} = \sigma_{\text{CB},i,t} Q_{\text{CBstep},i} \quad (29)$$

式中： $\sigma_{\text{CB},i,t}$ 为*t*时刻节点*i*投运的 CB 组数，是整数变量； $Q_{\text{CBstep},i}$ 为每台 CB 补偿的无功功率。

一般情况下配电网对 CB 组数的调节范围和调节次数也有一定的限制，约束条件<sup>[32]</sup>为

$$\begin{cases} \delta_{\text{CBIN},i,t} + \delta_{\text{CBDE},i,t} \leq 1 \\ \sum_{t=1}^T (\delta_{\text{CBIN},i,t} + \delta_{\text{CBDE},i,t}) \leq N_{\text{CBmax},i} \\ \sigma_{\text{CB},i,t} - \sigma_{\text{CB},i,t-1} \leq \delta_{\text{CBIN},i,t} S_{\text{RCB},i} - \delta_{\text{CBDE},i,t} \\ \sigma_{\text{CB},i,t} - \sigma_{\text{CB},i,t-1} \geq \delta_{\text{CBIN},i,t} - \delta_{\text{CBDE},i,t} S_{\text{RCB},i} \end{cases} \quad (30)$$

式中： $\delta_{\text{CBIN},i,t}$ 、 $\delta_{\text{CBDE},i,t}$ 表示*t*时刻节点*i*处 CB 投切操作的 0-1 标识符，当*t*时刻节点*i*处增加投入的 CB 组数时， $\delta_{\text{CBIN},i,t}$ 为 1， $\delta_{\text{CBDE},i,t}$ 为 0，反之同理； $N_{\text{CBmax},i}$ 为节点*i*处 CB 在*T*时段内的最大调节次数； $S_{\text{RCB},i}$ 为节点*i*处 CB 单次投切的最大组数。

### 3.2.5 SVC 约束

SVC 可进行连续的无功补偿，其约束模型为

$$Q_{\text{SVC},\min,i} \leq Q_{\text{SVC},i,t} \leq Q_{\text{SVC},\max,i} \quad (31)$$

式中， $Q_{\text{SVC},\max,i}$ 、 $Q_{\text{SVC},\min,i}$ 分别为节点*i*处接入 SVC 的无功功率上下限。

### 3.2.6 需求侧响应约束

需求侧响应约束模型如式(4)一式(12)所示。

### 3.2.7 SOP 约束

SOP 约束模型如式(1)一式(3)所示。

### 3.2.8 储能约束

储能系统的充放电过程可以描述为

$$\begin{cases} E_{ESS,t+1} = E_{ESS,t} + P_{ESSch,t} \eta_{ch} - P_{ESSdis,t} / \eta_{dis} \\ E_{ESS,1} = E_{ESS,T} + P_{ESSch,T} \eta_{ch} - P_{ESSdis,T} / \eta_{dis} \end{cases} \quad (32)$$

式中:  $E_{ESS,t}$  为  $t$  时刻储能装置的剩余电量;  $P_{ESSch,t}$  和  $P_{ESSdis,t}$  分别为  $t$  时刻储能装置的充放电功率;  $\eta_{ch}$  和  $\eta_{dis}$  分别为储能装置的充放电效率。

为了避免储能装置的深度充电、放电而影响其使用寿命, 储能的荷电状态和充放电功率应满足式(33)的约束。

$$\begin{cases} P_{ESS,t} = P_{ESSch,t} - P_{ESSdis,t} \\ 0 \leq P_{ESSch,t} \leq P_{ESSch,max} L_{ch,t} \\ 0 \leq P_{ESSdis,t} \leq P_{ESSdis,max} L_{dis,t} \\ L_{ch,t} + L_{dis,t} \leq 1 \\ E_{ESS,min} \leq E_{ESS,t} \leq E_{ESS,max} \end{cases} \quad (33)$$

式中:  $P_{ESSch,max}$  和  $P_{ESSdis,max}$  分别为储能装置的最大充放电功率;  $L_{ch,t}$  和  $L_{dis,t}$  为  $t$  时刻储能装置充放电的 0-1 标识符, 当  $t$  时刻储能装置进行充电时,  $L_{ch,t}$  为 1,  $L_{dis,t}$  为 0, 反之同理;  $E_{ESS,max}$  和  $E_{ESS,min}$  分别为储能装置的最大电量和最小电量。

## 4 模型线性化

### 4.1 潮流模型线性化

针对潮流约束模型, 通过引入中间变量  $X_{i,t}$ 、 $Y_{ij,t}$ 、 $Z_{ij,t}$  进行替换, 将非线性模型线性化, 具体流程<sup>[28]</sup>如式(34)所示。

$$\begin{cases} X_{i,t} = U_{i,t}^2 \\ Y_{ij,t} = U_{i,t} U_{j,t} \cos \theta_{ij,t} \\ Z_{ij,t} = U_{i,t} U_{j,t} \sin \theta_{ij,t} \end{cases} \quad (34)$$

被替换后的潮流模型为

$$\begin{cases} P_{i,t} = G_{ii} X_{i,t} + \sum_{j \in \Omega} (G_{ij} Y_{ij,t} + B_{ij} Z_{ij,t}) \\ Q_{i,t} = -B_{ii} X_{i,t} - \sum_{j \in \Omega} (B_{ij} Y_{ij,t} - G_{ij} Z_{ij,t}) \\ U_{i,min}^2 \leq X_{i,t} \leq U_{i,max}^2 \\ I_{ij,t}^2 = (G_{ij}^2 + B_{ij}^2)(X_{i,t} + X_{j,t} - 2Y_{ij,t}) \leq I_{ij,max}^2 \end{cases} \quad (35)$$

### 4.2 SOP 相关约束线性化

把式(1)转换为二阶锥形式, 如式(36)所示。

$$\| [P_{SOP,i,t} \quad Q_{SOP,i,t}]^T \|_2 \leq S_{SOP,i,max} \quad i = 1, 2, 3 \quad (36)$$

对式(3)进行去绝对值转化, 可以得到

$$\begin{cases} P_{loss,i,t} \geq m_{loss} P_{SOP,i,t} \\ P_{loss,i,t} \geq -m_{loss} P_{SOP,i,t} \end{cases} \quad i = 1, 2, 3 \quad (37)$$

### 4.3 电压偏差线性化

针对式(15), 引入  $t$  时刻节点  $i$  的电压偏差  $\Delta U_{i,t}$ , 进行去绝对值转化, 可以得到<sup>[33]</sup>

$$\Delta U_{i,t} = |U_{i,t} - U_{i,t}^{rated}| \quad (38)$$

$$f_{vol} = \sum_{t=1}^T \sum_{i \in \Omega} \Delta U_{i,t} \quad (39)$$

增加约束:

$$\begin{cases} \Delta U_{i,t} \geq U_{i,t} - U_{i,t}^{rated} \\ \Delta U_{i,t} \geq U_{i,t}^{rated} - U_{i,t} \end{cases} \quad (40)$$

上述线性化处理将原模型转换为一个混合整数二阶锥规划模型<sup>[34]</sup>, 采用 YALMIP 和 GUROBI 对该模型进行求解。

## 5 算例分析

### 5.1 算例描述

本文采用改进的 IEEE 33 和 IEEE 69 节点配电系统对考虑含 ESS 的三端 SOP 与 DR 的 ADN 有功无功协调优化策略进行分析, 算例说明及参数详见附录 A 和附录 B。模型在主频为 3.3 GHz、内存为 16 GB 的 PC 上采用 Matlab R2018b 仿真平台进行测试, 并内嵌 YALMIP 混合整数优化工具箱调用 GUROBI 9.5 版本进行优化求解。

### 5.2 IEEE 33 节点配电系统优化结果分析

为了验证所提优化策略在改善配电网电压质量, 降低网络损耗, 减小负荷峰谷差等方面的优势, 采用了以下 4 个方案进行对比分析: 方案 1: 仅考虑 DG; 方案 2: 考虑 DG 与 OLTC、CB、SVC 的协同优化; 方案 3: 在方案 2 的基础上考虑 DR; 方案 4: 在方案 3 的基础上考虑含储能的三端 SOP。

仿真结果如附录 A 表 A3 所示。在原始系统中, 配电网的网络损耗和电压质量问题较为严重。方案 1 考虑了 DG 的接入, DG 能够为配电网提供有功功率, 减小了配电网向上级电网的购电量。DG 在向配电网提供有功功率的同时还提供了一定的无功支撑, 使得配电网的网络损耗和电压偏差都得到了一定程度的降低。但是由于功率因数的限制, DG 提供的无功功率非常有限, 无法满足配电网的需求, 仍然存在电压越下限的情况。方案 1 的电压分布情况如附录 A 图 A3 所示。由于可再生能源出力具有不确定性, 未能与负荷需求进行良好匹配, 导致弃

风弃光量达到了 3.026 MWh。方案 2 在方案 1 的基础上,考虑了 OLTC、CB 和 SVC 这类传统无功补偿设备,有效改善了配电网的网络损耗和电压水平,消除了电压越下限的情况。方案 2 的电压分布情况如附录 A 图 A4 所示。与方案 1 相比,方案 2 在网络损耗方面减小了 18.70%,在电压偏差方面减小了 49.89%,但是仍然没有解决可再生能源出力和负荷需求的匹配问题,弃风弃光严重的情况未能得到改善。方案 3 在方案 2 的基础上加入了 DR,在考虑配电网安全经济运行的同时,还考虑了用户舒适度和用户经济度。相比于方案 1,方案 3 在网络损耗方面和电压偏差方面分别减小了 23.67%和 50.94%,方案 3 的电压分布情况如附录 A 图 A5 所示。由于只考虑了 6 个节点参与 DR,加上用户舒适度指标限制了中断负荷和转移负荷量,使得方案 3 的优化效果相较于方案 2 来说不是特别明显,但也得到了一定程度的提高。方案 4 在方案 3 的基础上加入了含 ESS 的三端 SOP,平衡了馈线间的有功潮流,减小了线路损耗;同时,SOP 还提供了一定的无功支撑,改善了电压质量。方案 4 的电压分布情况如附录 A 图 A6 所示。ESS 的加入进一步改善了负荷曲线,使其与可再生能源出力相匹配,减小了弃风弃光量。相比于方案 1,方案 4 在网络损耗方面减小了 57.03%,在电压偏差方面减小了 77.76%,在弃风弃光量方面减小了 76.04%。由此可见,所提出的优化策略在减小网络损耗和电压偏差的同时,还能促进可再生能源消纳,提高了配电网运行的经济性和安全性。

图 3 和图 4 描述了不同方案在各个时段下的网络损耗和电压偏差。可以看出,方案 1 中的网络损耗和电压偏差主要集中在负荷高峰时段,配电网在该时段的电压水平整体偏低,低电压下的功率传输会产生更多的线路损耗。方案 2 中考虑了无功补偿设备,通过改善配电网在负荷高峰时段的电压质量,使其更接近额定电压,减小线路传输损耗。方案 3 考虑了 DR,通过削减和转移负荷高峰时段的负荷量,减小线路重载的情况,在一定程度上减小了网络损耗和电压偏差。方案 4 中考虑了含 ESS 的三端 SOP,SOP 能够进行多条线路之间的功率交互,在负荷高峰时段,可以通过轻载的线路给负荷需求较大的区域供电,减小了线路重载的情况。同时,SOP 还能够提供一定的无功功率,提高线路末端区域的电压水平,进一步减小了网络损耗和电压偏差。

以 18:00 时的配电网电压分布情况为例进行分析,如图 5 所示。

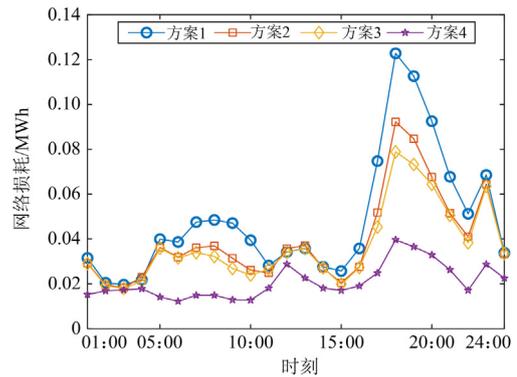


图 3 网络损耗图

Fig. 3 Network loss

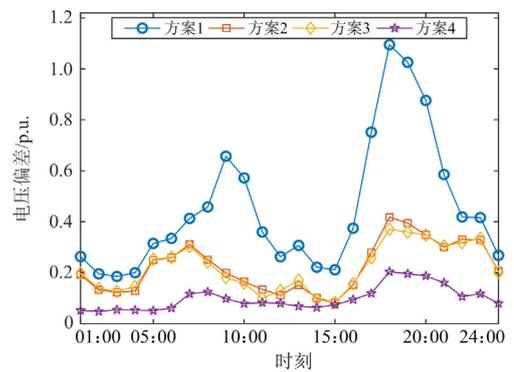


图 4 电压偏差图

Fig. 4 Voltage deviation

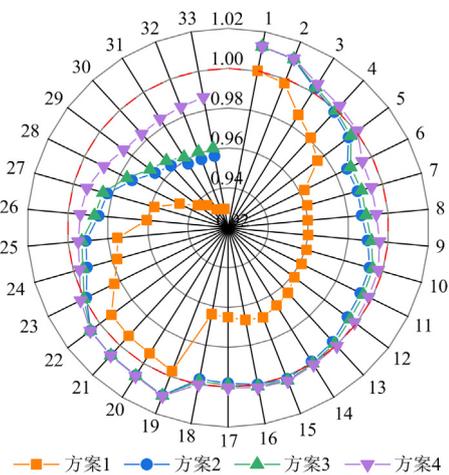


图 5 18:00 时配电网电压曲线图

Fig. 5 Voltage curve of distribution network at 18:00

该时段负荷需求较大而可再生能源出力不足,需要从上级电网进行购电,功率从首端向末端进行流动,电压逐渐递减,配电网整体电压较低。方案 1 中出现了末端节点电压越下限的情况。方案 2、3、4 中通过 OLTC 抬高了配电网的整体电压,同时利

用 CB 和 SVC 就近无功补偿, 减少了无功远距离传输的情况, 缓解了电压降落的程度。方案 4 中三端 SOP 不仅对末端节点进行了无功补偿, 还通过轻载线路与末端节点进行功率交互, 进一步抬高了配电网末端区域的节点电压, 使负荷高峰时段的配电网电压更加接近额定电压。

图 6 描述了方案 3 和方案 4 的负荷曲线。可以看出, 方案 3 考虑了 DR, 在负荷高峰时段有部分负荷被削减, 有部分负荷被转移到了负荷低谷时段。实施 DR 前的负荷峰谷差为 2.965 MWh, 实施 DR 后的负荷峰谷差为 2.754 MWh。采用 DR 前后配电网的负荷峰谷差有了一定的改善。方案 4 在方案 3 的基础上考虑了含 ESS 的三端 SOP, 可以看出 ESS 在负荷高峰时段充当电源, 在负荷低谷时段充当负荷, 利用其削峰填谷的能力进一步改善了负荷峰谷差, 减小为 2.195 MWh。

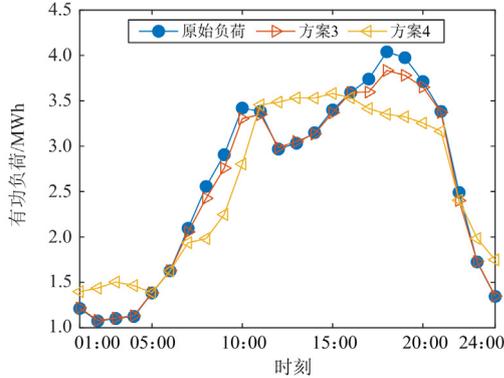


图 6 方案 3 与方案 4 的负荷曲线图

Fig. 6 Load curve of case 3 and case 4

图 7 描述了方案 4 中 OLTC 和 CB 的挡位调节, 在负荷高峰时段, 线路末端节点的电压较低, 将 OLTC 挡位调高至 1.0125 来提高线路末端节点电压, 增加 CB 投入的组数来满足配电网的无功需求。在负荷低谷时段, 配电网的整体电压水平较高, 将 OLTC 挡位下调至 1, 减小 CB 投入的组数, 使配电网电压维持在额定电压附近小范围波动。由于动作次数的限制, OLTC 和 CB 并未进行频繁操作, 延长了 OLTC 和 CB 的使用寿命, 提高了配电网运行的经济性。

图 8 是方案 4 中 DG 和 SVC 的无功功率图, 在 00:00—07:00 时段, 光伏出力为 0, 不参与无功优化, 风电和 SVC 承担了主要的连续无功补偿任务, 在 08:00—17:00 时段, 风电出力较小, 光伏和 SVC 承担了主要的连续无功补偿任务, 在 20:00—24:00 时段, 光伏出力又减小为 0, 连续无功补偿的任务又回到了 SVC 和风电上。

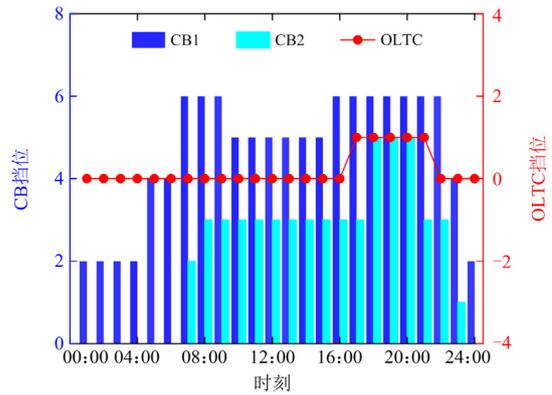


图 7 方案 4 中 OLTC 和 CB 的挡位调节图

Fig. 7 Adjustment tap of OLTC and CB in case 4

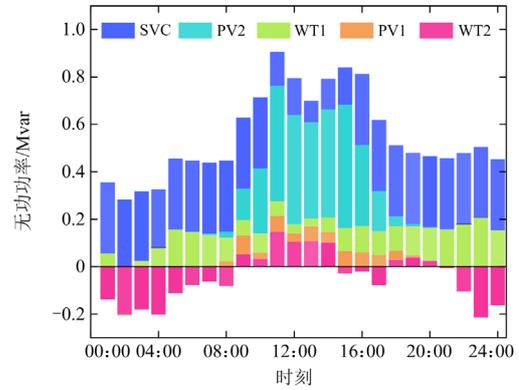


图 8 方案 4 中 DG 和 SVC 的无功功率图

Fig. 8 Reactive power of DG and SVC in case 4

图 9 是方案 4 中含 ESS 的三端 SOP 各端口的有功功率图, 3 台 VSC 输出的有功功率之和等于储能系统的充、放电功率。在 00:00—06:00 和 21:00—24:00 时段, WT1 和 WT2 出力较大, 为了促进可再生能源消纳和减小线路传输损耗, WT2 通过端口 1 向其他两个端口所连接的线路输送功率。由于该时段负荷需求较小, 无法消纳多余的可再生能源, 于是利用 ESS 进行充电, 减小弃风弃光量。在 07:00—10:00 和 16:00—21:00 时段, 负荷需求较大, 风机和光伏出力较小, 难以满足负荷需求, ESS 进行放电。在 11:00—15:00 时段, 负荷需求有一定程度的下降, 风机出力较小, 光伏出力较大, PV1 和 PV2 分别通过端口 2 和端口 3 向端口 1 所连接的线路供电, ESS 也在该时段进行充电, 吸收多余的光伏出力。

图 10 是方案 4 中含 ESS 的三端 SOP 各端口的无功功率图, SOP 各端口在进行有功输出的同时还提供一定的无功支撑, 改善了端口附近节点的电压。图 11 是方案 4 中 ESS 有功功率及 SOC 曲线图。可

以看出 ESS 在负荷高峰时段放电，在负荷低谷时段充电，在调度周期结束时，SOC 恢复到 0.5 的水平。

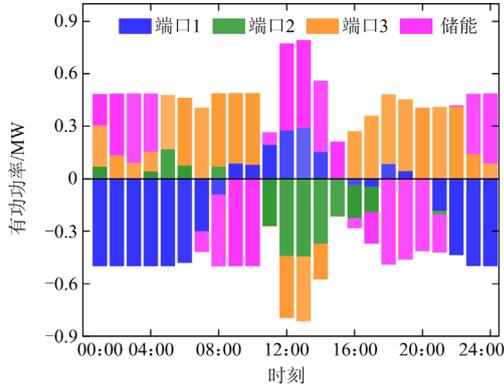


图 9 方案 4 中含 ESS 的三端 SOP 各端口的有功功率图  
Fig. 9 Active power of each terminal of the three-terminal SOP with ESS in case 4

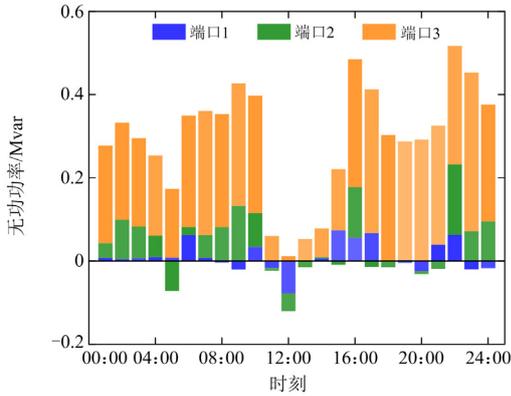


图 10 方案 4 中含 ESS 的三端 SOP 各端口的无功功率图  
Fig. 10 Reactive power of each terminal of the three-terminal SOP with ESS in case 4

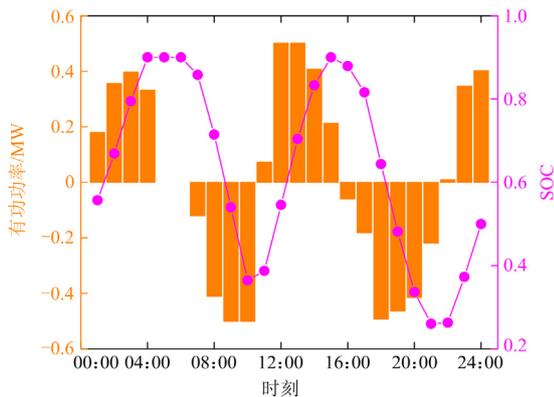


图 11 方案 4 中 ESS 有功功率及 SOC 曲线图  
Fig. 11 Active power of ESS and SOC curve in case 4

综上所述，无功补偿装置的加入改善了配电网的电压质量，DR 的加入优化了负荷曲线，实现了

负荷的削峰填谷。三端 SOP 可以根据 DG 出力和负荷需求灵活地控制有功功率在馈线之间传输，均衡线路负载，减小网络损耗；同时三端 SOP 还能提供一定的无功功率，进一步改善了配电网的电压质量。ESS 与三端 SOP 的集成弥补了 DG 出力与负荷需求之间匹配度的不足，促进了可再生能源的消纳，提高了配电网运行的经济性与安全性。

### 5.3 IEEE 69 节点配电系统优化结果分析

为了进一步验证本文所提优化策略的适用性和有效性，采用改进的 IEEE 69 节点配电系统对优化策略进行分析。仿真结果如附录 B 表 B3 所示。结果与改进的 IEEE 33 节点配电系统仿真结果相似。充分体现了 DR 与含 ESS 的三端 SOP 的协调优化在减小网络损耗和电压偏差，促进可再生能源消纳和提高电压质量方面的优势。验证了所提优化策略在不同的网络结构中也能取得理想的优化结果。

### 5.4 不同目标权重下的优化结果分析

为了验证不同目标权重对优化结果产生的影响，在改进的 IEEE 33 节点配电系统中设置了 4 组权重值进行了对比分析，仿真结果如附录 C 表 C1 所示。当  $\omega_1$  设置为 0.7 时，配电网的网络损耗减小，但是电压被整体抬高，电压偏差和弃风弃光量增大。当  $\omega_2$  设置为 0.7 时，配电网的电压偏差减小，但是网络损耗增加。当  $\omega_3$  设置为 0.7 时，配电网的弃风弃光量减小，但是为了促进新能源消纳，DG 向较远的负荷节点供电，导致网络损耗增加。当  $\omega_4$  设置为 0.7 时，配电网在保持用户舒适度较高的同时也取得了不错的用户经济度，但是其他指标略有升高。由此看来，目标权重的选择会对优化结果产生不同程度的影响，配电网能够根据实际需求合理设置目标权重。

### 5.5 考虑可再生能源出力不确定性

为了应对可再生能源出力的不确定性，本文将 CGAN 模型应用于日前场景生成。以河南开封地区 2016 年到 2018 年的风光预测数据和实测数据作为样本集，数据以 1 h 为时间间隔，共 24 000 组数据。剔除掉错误数据之后，对剩余数据进行归一化处理。将风光实测数据作为真实样本，风光预测数据作为条件对模型进行训练，学习风光预测数据与实测数据之间的映射关系。CGAN 模型的参数设置参考文献[27]。训练完成以后，针对本文的风光出力预测曲线，生成 300 个日前场景。然后采用 k-means 聚类方法对场景进行聚类，生成 5 个典型场景，风光出力如附录 C 图 C1 和图 C2 所示。5 个典型场景的概率如表 1 所示。

表 1 典型场景概率

Table 1 Typical scenario probability

场景编号	概率
场景 1	0.22
场景 2	0.23
场景 3	0.17
场景 4	0.18
场景 5	0.20

在改进的 IEEE 33 节点配电系统中进行仿真, 获取每个场景下的目标函数, 将其与对应场景的概率相乘求和, 得到各个目标函数的期望值。如附录 C 表 C2 所示。可以看出, 风光出力的变化对各个目标函数都产生了不同程度的影响, 其中对弃风弃光量和从上级电网购电量的影响较为明显。与基于预测曲线获得的优化调度结果相比, 采用随机优化得到的优化调度结果更加保守。这是由于考虑了可再生能源出力的不确定性。采用 CGAN 模型来生成日前场景能够很好地模拟真实风光出力分布。为了应对各种场景, 通过实施本文提出的优化调度策略来优化各个设备的出力, 减小风光出力不确定性对配电网的影响, 提高系统运行的安全性。

## 6 结语

针对高比例 DG 接入导致的节点电压越限、线路损耗增加等问题, 本文提出了一种考虑含 ESS 的三端 SOP 与 DR 的主动配电网有功无功协调优化策略。通过算例分析, 得出以下结论。

1) DR 能够削减尖端负荷, 减小负荷峰谷差; SOP 能够连续、快速地控制有功功率在不同馈线之间流动, 平衡不同馈线之间的潮流, 同时 SOP 还能够提供一定的无功支撑, 提升端口附近节点的电压水平。ESS 装置能够帮助三端 SOP 在更大范围内

调节馈线间的实时功率, 减少弃风弃光量。含 ESS 的三端 SOP 与 DR 的协调优化能够在兼顾用户舒适度与用户经济度的同时, 减小网络损耗和电压偏差, 促进可再生能源消纳, 实现配电网安全经济运行。

2) 采用改进的 IEEE 33 和 IEEE 69 节点配电系统对提出的优化策略进行分析, 验证了所提优化策略在不同的网络结构中也能取得理想的优化结果。

3) 考虑可再生能源出力的不确定性, 基于 CGAN 生成日前场景, 为了应对可能到来的场景, 综合优化各个设备的出力, 能够获取更加保守的优化结果, 减小风光出力波动对配电网的影响。

配电网的有功无功协调优化是一个综合性问题, 未来将进一步研究和探索更多的协调优化手段来提升配电网运行水平。

## 附录 A

改进的 IEEE 33 节点配电系统的网络结构如图 A1 所示。整个系统的风光出力预测曲线和负荷大小如图 A2 所示。分时电价如表 A1 所示。设备参数如表 A2 所示, DG 的功率因数均为 0.9。三端 SOP 的损耗系数为 0.02。ESS 的充放电效率均为 0.95, 荷电状态上下限为 0.9 和 0.2。节点 8、24 和 32 接入可中断负荷, 可中断量为该节点当前负荷的 20%, 一天内的最大中断时间为 8 h, 最大中断持续时间为 3 h, 最小中断时间间隔为 2 h。节点 17、22 和 28 接入可转移负荷, 可转移量为该节点当前负荷的 10%, 参与需求侧响应的负荷的功率因数为 0.9。

表 A1 分时电价

Table A1 Time-of-use electricity price

时段	价格/(元/kWh)
01:00—6:00 23:00—24:00	0.35
06:00—12:00 18:00—23:00	0.65
12:00—18:00	0.5

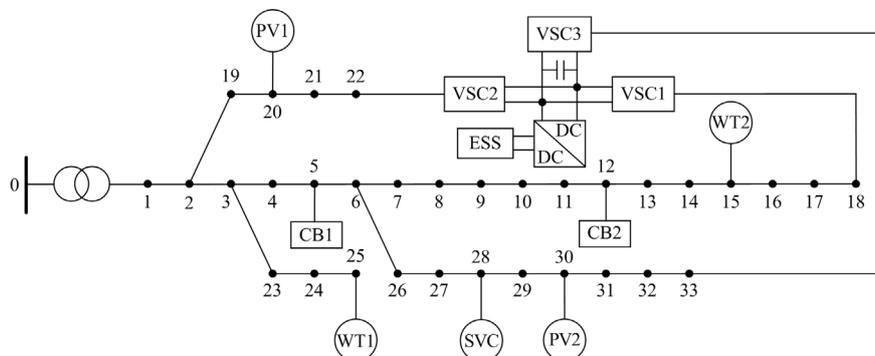


图 A1 改进的 IEEE 33 节点配电系统网络结构

Fig. A1 Network structure of improved IEEE 33 node distribution system

表 A2 设备参数

Table A2 Equipment parameter

设备类型	接入位置	容量	调节范围	单次动作次数上限	总动作次数上限
WT	15,25	0.5 MVA, 1.6 MVA	—	—	—
PV	20,30	1.8 MVA, 2 MVA	—	—	—
OLTC	0-1	0.0125×9	[0.95, 1.05]	3	12
CB	5,12	0.1 Mvar×6	[0, 0.6] Mvar	2	12
SVC	28	—	[-0.3, 0.3] Mvar	—	—
三端 SOP	18,22,33	0.5 MVA×3	—	—	—
ESS	三端 SOP 直流侧	3 MVA	[-0.5, 0.5] MVA	—	—

表 A3 仿真结果

Table A3 Simulation result

算例编号	网络损耗/MWh	向上级电网购电量/MWh	电压偏差/p.u.	弃风弃光量/MWh	用户舒适度	用户经济度
原始系统	2.6	65.037	53.657	—	—	—
方案 1	1.166	23.029	21.31	3.026	1	0
方案 2	0.948	22.816	10.678	3.031	1	0
方案 3	0.89	21.552	10.454	2.967	0.98	0.02
方案 4	0.501	19.485	4.74	0.725	0.978	0.022

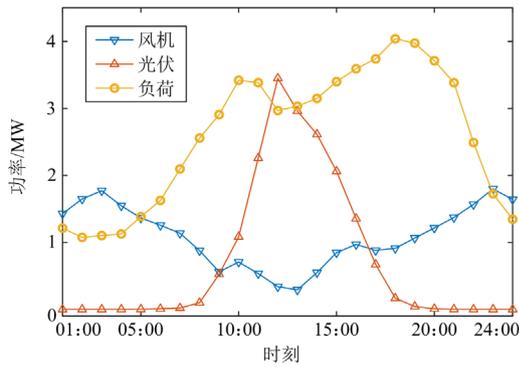


图 A2 可再生能源及负荷出力曲线图

Fig. A2 Output of renewable energy and load

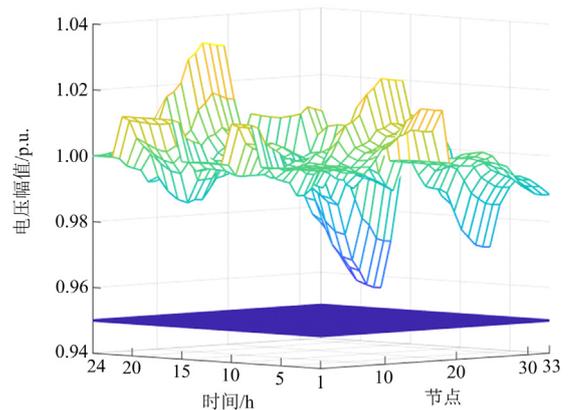


图 A4 方案 2 电压曲线图

Fig. A4 Voltage curve of case 2

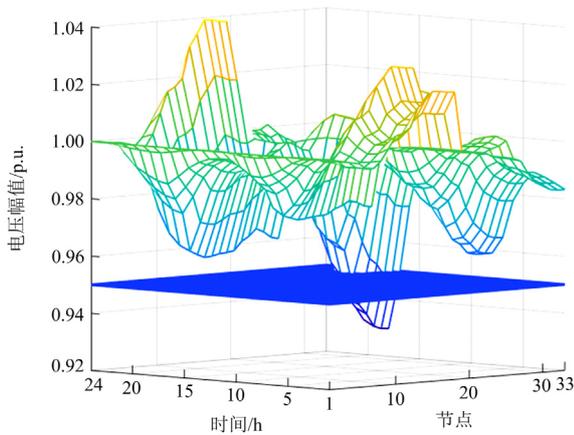


图 A3 方案 1 电压曲线图

Fig. A3 Voltage curve of case 1

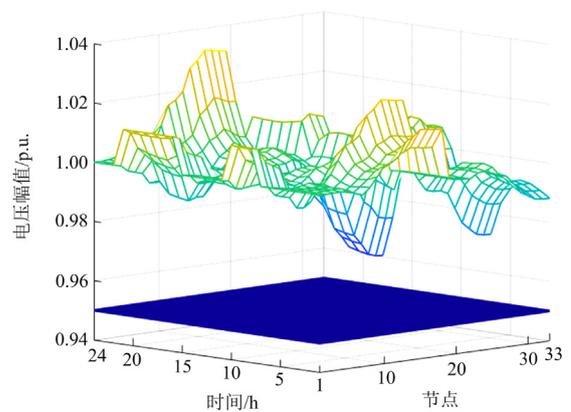


图 A5 方案 3 电压曲线图

Fig. A5 Voltage curve of case 3

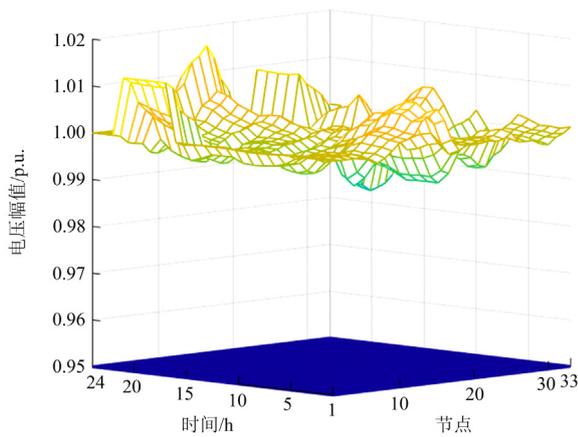


图 A6 方案 4 电压曲线图

Fig. A6 Voltage curve of case 4

## 附录 B

改进的 IEEE 69 节点配电系统的网络结构如图

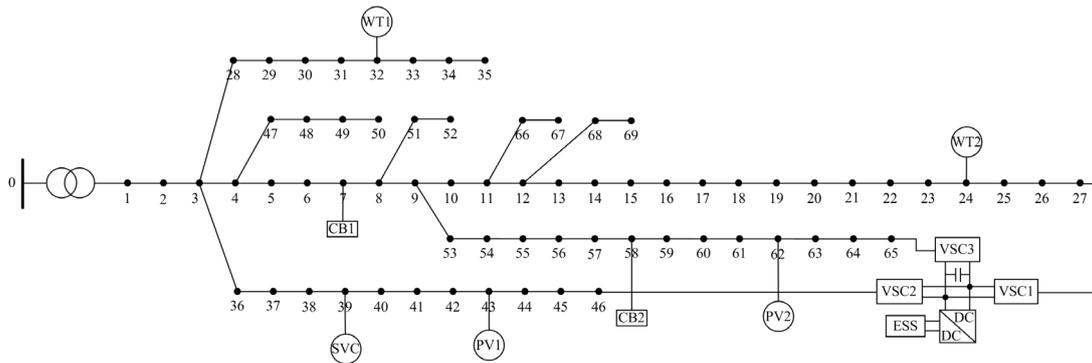


图 B1 改进的 IEEE 69 节点配电系统网络结构

Fig. B1 Network structure of improved IEEE 69 node distribution system

表 B2 设备参数

Table B2 Equipment parameter

设备类型	接入位置	容量	调节范围	单次动作次数上限	总动作次数上限
WT	24,32	1.5 MVA, 0.5 MVA	—	—	—
PV	43,62	2 MVA, 0.5 MVA	—	—	—
OLTC	0-1	0.0125×9	[0.95, 1.05]	3	12
CB	7,58	0.1 Mvar×5	[0, 0.5] Mvar	2	12
SVC	39	—	[-0.2, 0.2] Mvar	—	—
三端 SOP	27,46,65	0.5 MVA×3	—	—	—
ESS	三端 SOP 直流侧	3 MVA	[-0.5,0.5] MVA	—	—

表 B3 仿真结果

Table B3 Simulation result

算例编号	网络损耗/MWh	向上级电网购电量/MWh	电压偏差/p.u.	弃风弃光量/MWh	用户舒适度	用户经济度	电压范围/p.u.
原始系统	1.953	53.067	47.378	—	—	—	0.918~1.0
方案 1	1.709	20.285	31.584	3.884	1	0	0.928~1.035
方案 2	1.374	19.970	26.612	3.905	1	0	0.938~1.036
方案 3	1.164	16.911	24.952	3.907	0.944	0.058	0.945~1.036
方案 4	0.575	13.801	13.628	0	0.944	0.058	0.968~1.025

B1 所示。整个系统的风光出力预测曲线和负荷大小如图 B2 所示。分时电价如表 B1 所示。设备参数如表 B2 所示。DG 的功率因数均为 0.9。三端 SOP 的损耗系数为 0.02。ESS 的充放电效率均为 0.95, 荷电状态上下限为 0.9 和 0.2。节点 49、0、61 和 64 接入可中断负荷, 可中断量为该节点当前负荷的 20%, 一天内的最大中断时间为 8 h, 最大中断持续时间为 3 h, 最小中断时间间隔为 2 h。节点 17、18、48 和 59 接入可转移负荷, 可转移量为该节点当前负荷的 10%。参与需求侧响应的负荷的功率因数为 0.9。

表 B1 分时电价

Table B1 Time-of-use electricity price

时段	价格/(元/kWh)
01:00—06:00	0.35
06:00—12:00	0.65
12:00—18:00	0.5
18:00—23:00	0.65
23:00—24:00	0.35

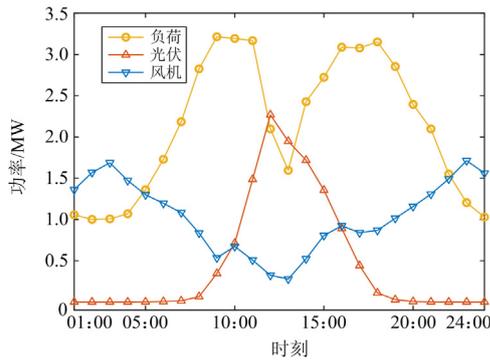


图 B2 可再生能源及负荷出力曲线图

Fig. B2 Output of renewable energy and load

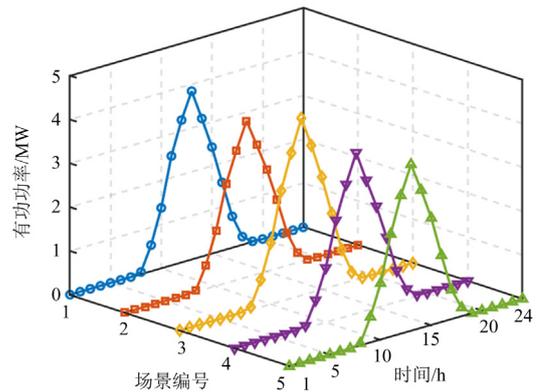


图 C2 典型场景光伏出力

Fig. C2 Photovoltaic output of typical scenario

附录 C

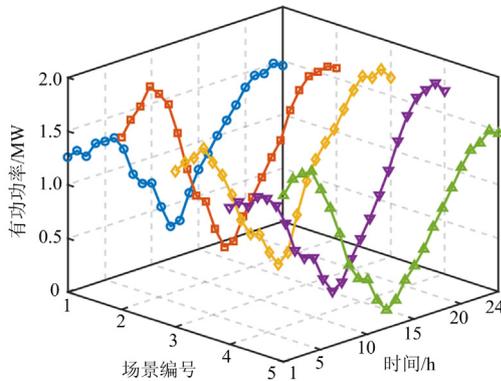


图 C1 典型场景风机出力

Fig. C1 Wind turbine output of typical scenarios

表 C1 不同权重下的目标函数

Table C1 Objective function under different weights

权重值	网络损耗/MWh	向上级电网购买电量/MWh	电压偏差/p.u.	弃风弃光量/MWh	用户舒适度	用户经济度
$\omega_1 = 0.25, \omega_2 = 0.25, \omega_3 = 0.25, \omega_4 = 0.25$	0.501	19.485	4.74	0.725	0.978	0.022
$\omega_1 = 0.7, \omega_2 = 0.1, \omega_3 = 0.1, \omega_4 = 0.1$	0.443	19.885	6.141	1.144	0.977	0.021
$\omega_1 = 0.1, \omega_2 = 0.7, \omega_3 = 0.1, \omega_4 = 0.1$	0.643	19.544	3.627	0.692	0.978	0.021
$\omega_1 = 0.1, \omega_2 = 0.1, \omega_3 = 0.7, \omega_4 = 0.1$	0.574	19.429	4.766	0	0.979	0.022
$\omega_1 = 0.1, \omega_2 = 0.1, \omega_3 = 0.1, \omega_4 = 0.7$	0.515	19.583	4.988	0.772	0.982	0.020

表 C2 各场景的目标函数

Table C2 Objective function of each scenario

场景编号	网络损耗/MWh	向上级电网购买电量/MWh	电压偏差/p.u.	弃风弃光量/MWh	用户舒适度	用户经济度
场景 1	0.508	18.744	5.105	1.149	0.978	0.022
场景 2	0.552	20.164	5.044	1.328	0.979	0.020
场景 3	0.577	16.765	5.476	2.337	0.98	0.02
场景 4	0.529	20.709	5.314	0.483	0.978	0.021
场景 5	0.577	15.800	5.600	1.581	0.979	0.022
期望值	0.547	18.499	5.29	1.359	0.979	0.021

参考文献

[1] 寇凌峰, 吴鸣, 李洋, 等. 主动配电网分布式有功无功优化调控方法[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(6): 1856-1865.  
KOU Lingfeng, WU Ming, LI Yang, et al. Optimization and control method of distributed active and reactive power in active distribution network[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(6): 1856-1865.

[2] 蔡永翔, 唐巍, 张博, 等. 适应高比例户用光伏的中低压配电网集中-分布式协调控制[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(15): 4843-4854.

CAI Yongxiang, TANG Wei, ZHANG Bo, et al. Centralized-distributed multi-objective coordinated control for MV and LV distribution networks adapting to high-proportion residential PV units[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(15): 4843-4854.

[3] GAO Hongjun, LIU Junyong, WANG Lingfeng. Robust coordinated optimization of active and reactive power in active distribution systems[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2018, 9(5): 4436-4447.

[4] 朱彦名, 徐潇源, 严正, 等. 面向电力物联网的含可再生能源配电网运行展望[J]. 电力系统保护与控制,

- 2022, 50(2): 176-187.
- ZHU Yanming, XU Xiaoyuan, YAN Zheng, et al. Prospect of renewable energy integrated distribution network operation in the power internet of things[J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(2): 176-187.
- [5] FAZIO A R D, RISI C, RUSSO M, et al. Coordinated optimization for zone-based voltage control in distribution grids[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2022, 58(1): 173-184.
- [6] 周霞, 刘懿诗, 戴剑丰, 等. 考虑风-储-直参与调频的电力系统频率特征定量分析[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(6): 30-44.
- ZHOU Xia, LIU Yishi, DAI Jianfeng, et al. Quantitative analysis of power system frequency characteristics considering wind power-energy storage-flexible HVDC transmission participation in frequency modulation[J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(6): 30-44.
- [7] 钱科军, 刘乙, 张新松, 等. 考虑电动汽车充电负荷的配电系统场景概率潮流分析[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(24): 62-70.
- QIAN Kejun, LIU Yi, ZHANG Xinsong, et al. Scenario-based probabilistic power flow calculation of distribution systems with electric vehicle charging loads[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(24): 62-70.
- [8] 何鑫, 刘俊勇, 高红均, 等. 计及光伏不确定性和低碳需求响应的工业园区光-储分布鲁棒规划模型[J]. 智慧电力, 2023, 51(2): 69-76.
- HE Xin, LIU Junyong, GAO Hongjun, et al. Photovoltaic-energy storage distributed robust planning model for industrial parks considering photovoltaic uncertainty and low-carbon demand response[J]. Smart Power, 2023, 51(2): 69-76.
- [9] 张宇威, 肖金星, 杨军, 等. 基于风光数据驱动不确定集合的配电网与多微网鲁棒经济调度[J]. 电力建设, 2021, 42(10): 40-50.
- ZHANG Yuwei, XIAO Jinxing, YANG Jun, et al. Data-driven robust economic dispatch for distribution network and multiple micro-grids considering correlativity of wind and solar output[J]. Electric Power Construction, 2021, 42(10): 40-50.
- [10] 张涛, 穆云飞, 贾宏杰, 等. 含电力电子变压器的交直流配电网随机运行优化[J]. 电网技术, 2022, 46(3): 860-869.
- ZHANG Tao, MU Yunfei, JIA Hongjie, et al. Stochastic operation optimization for AC/DC distribution network with power electronic transformer[J]. Power System Technology, 2022, 46(3): 860-869.
- [11] 朱庆, 郑红娟, 唐子逸, 等. 基于生成对抗网络的综合能源负荷场景生成方法[J]. 电力建设, 2021, 42(12): 1-8.
- ZHU Qing, ZHENG Hongjuan, TANG Ziyi, et al. Load scenario generation of integrated energy system using generative adversarial networks[J]. Electric Power Construction, 2021, 42(12): 1-8.
- [12] 顾洁, 刘书琪, 胡玉, 等. 基于深度卷积生成对抗网络场景生成的间歇式分布式电源优化配置[J]. 电网技术, 2021, 45(5): 1742-1751.
- GU Jie, LIU Shuqi, HU Yu, et al. Optimal allocation of intermittent distributed generation based on deep convolutions generative adversarial network in scenario generation[J]. Power System Technology, 2021, 45(5): 1742-1751.
- [13] WU Lei, SHAHIDEHPOUR M, LI Zuyi, et al. Comparison of scenario-based and interval optimization approaches to stochastic SCUC[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2012, 27(2): 913-921.
- [14] 张蕊, 李铁成, 李晓明, 等. 考虑设备动作损耗的配电网分布式电压无功优化[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(24): 31-40.
- ZHANG Rui, LI Tiecheng, LI Xiaoming, et al. Distributed optimization for distribution networks volt/var control considering the operation cost of equipment[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(24): 31-40.
- [15] 李岩, 陈夏, 李巍巍, 等. 基于智能软开关与联络开关并联的柔性配电网互联结构与控制技术研究[J]. 中国电机工程学报, 2022, 42(13): 4749-4760.
- LI Yan, CHEN Xia, LI Weiwei, et al. Research on interconnection structure and control technology of flexible distribution network based on soft open point in parallel with interconnection switch[J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(13): 4749-4760.
- [16] 郑焕坤, 石甜静. 基于智能软开关和无功补偿装置的配电网双层优化[J]. 电力系统自动化, 2019, 43(19): 117-126.
- ZHENG Huankun, SHI Tianjing. Bi-level optimization of distribution network based on soft open point and reactive power compensation device[J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(19): 117-126.
- [17] 王杰, 王维庆, 王海云, 等. 考虑越限风险的主动配电网中 DG、SOP 与 ESS 的两阶段协调规划[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(24): 71-82.
- WANG Jie, WANG Weiqing, WANG Haiyun, et al. Two-stage coordinated planning of DG, SOP and ESS in an active distribution network considering violation risk[J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(24): 71-82.
- [18] 高聪哲, 黄文焘, 余墨多, 等. 基于智能软开关的主动配电网电压模型预测控制优化方法[J]. 电工技术学报, 2022, 37(13): 3263-3274.
- GAO Congzhe, HUANG Wentao, YU Moduo, et al. A model predictive control method to optimize voltages for active distribution networks with soft open point[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2022, 37(13): 3263-3274.
- [19] 于文山, 黎明, 由蕤, 等. 含储能的三端 SOP 对主动配电网的潮流优化研究[J]. 太阳能学报, 2022, 43(3): 101-110.
- YU Wenshan, LI Ming, YOU Rui, et al. Power flow

- optimization study on active distribution network based on three-terminal SOP with energy storage system[J]. *Acta Energetica Solaris Sinica*, 2022, 43(3): 101-110.
- [20] 祁江浩, 李凤婷, 张高航, 等. 需求响应分段参与的多时间尺度源荷协调调度策略[J]. *电力系统保护与控制*, 2021, 49(11): 61-69.
- QI Jianghao, LI Fengting, ZHANG Gaohang, et al. Multi-time scale scheduling strategy for source-load coordination considering demand response block participation[J]. *Power System Protection and Control*, 2021, 49(11): 61-69.
- [21] 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): 41-55.
- 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): 41-55.
- [22] 陈泽兴, 张勇军, 陈伯达, 等. 广义价格型需求侧响应下区域能源中心日前最优经济调度[J]. *中国电机工程学报*, 2020, 40(6): 1873-1886.
- CHEN Zexing, ZHANG Yongjun, CHEN Boda, et al. Optimal day-ahead economic dispatch for district energy centre considering the price based generalized demand response[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2020, 40(6): 1873-1886.
- [23] PENG Qiuyu, TANG Yujie, LOW S H, et al. Feeder reconfiguration in distribution networks based on convex relaxation of OPF[J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2015, 30(4): 1793-1804.
- [24] ALAA A S, MOHAMMAD A A, OMAR S A, et al. The effect of loss function on conditional generative adversarial networks[J]. *Journal of King Saud University Computer and Information Sciences*, 2022, 34(9): 6977-6988.
- [25] RODR I, GUEZ-SU A, REZ B, et al. Design of CGAN models for multispectral reconstruction in remote sensing[J]. *Remote Sensing*, 2022, 14(4): 816.
- [26] KIM K, KIM J, MOON Y J, et al. Nighttime reflectance generation in the visible band of satellites[J]. *Remote Sensing*, 2019, 11(18): 2087.
- [27] 董晓翀, 孙英云, 蒲天骄, 等. 基于条件生成对抗网络的可再生能源日前场景生成方法[J]. *中国电机工程学报*, 2020, 40(17): 5527-5536.
- DONG Xiaochong, SUN Yingyun, PU Tianjiao, et al. Day-ahead scenario generation of renewable energy based on conditional GAN[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2020, 40(17): 5527-5536.
- [28] 王志强, 方正, 刘文霞, 等. 基于概率多场景的柔性配电网鲁棒运行优化[J]. *电力自动化设备*, 2019, 39(7): 37-44.
- WANG Zhiqiang, FANG Zheng, LIU Wenxia, et al. Robust operation optimization of flexible distribution network based on probabilistic multi-scenario[J]. *Electric Power Automation Equipment*, 2019, 39(7): 37-44.
- [29] 章博, 刘晟源, 林振智, 等. 高比例新能源下考虑需求侧响应和智能软开关的配电网重构[J]. *电力系统自动化*, 2021, 45(8): 86-94.
- ZHANG Bo, LIU Chengyuan, LIN Zhenzhi, et al. Distribution network reconfiguration with high penetration of renewable energy considering demand response and soft open point[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2021, 45(8): 86-94.
- [30] 李秀磊, 耿光飞, 季玉琦, 等. 主动配电网中储能和需求侧响应的联合优化规划[J]. *电网技术*, 2016, 40(12): 3803-3810.
- LI Xiulei, GENG Guangfei, JI Yuqi, et al. Integrated optimal planning of energy storage and demand side response in active power distribution network[J]. *Power System Technology*, 2016, 40(12): 3803-3810.
- [31] 章健, 张玉晓, 熊壮壮, 等. 计及 DR 的新能源配电网电压无功协调优化[J]. *郑州大学学报(工学版)*, 2020, 41(2): 61-66.
- ZHANG Jian, ZHANG Yuxiao, XIONG Zhuangzhuang, et al. Voltage reactive power coordination optimization of distributed new energy network considering DR[J]. *Journal of Zhengzhou University (Engineering Science)*, 2020, 41(2): 61-66.
- [32] 阮贺彬, 高红均, 刘俊勇, 等. 考虑 DG 无功支撑和开关重构的主动配电网分布鲁棒无功优化模型[J]. *中国电机工程学报*, 2019, 39(3): 685-695, 948.
- RUAN Hebin, GAO Hongjun, LIU Junyong, et al. A distributionally robust reactive power optimization model for active distribution network considering reactive power support of DG and switch reconfiguration[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2019, 39(3): 685-695, 948.
- [33] JEON S, CHOI D H. Joint optimization of Volt/VAR control and mobile energy storage system scheduling in active power distribution networks under PV prediction uncertainty[J]. *Applied Energy*, 2022, 310.
- [34] 赖晓文, 马晓伟, 白杨, 等. 基于混合整数二阶锥规划的动态无功优化方法[J]. *电力系统自动化*, 2017, 41(17): 37-42.
- LAI Xiaowen, MA Xiaowei, BAI Yang, et al. Dynamic reactive power optimization method based on mixed integer second-order cone programming[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2017, 41(17): 37-42.

收稿日期: 2023-06-07; 修回日期: 2023-08-12

作者简介:

米 阳(1976—), 女, 博士, 教授, 研究方向为微网控制、电力系统稳定运行与控制等; E-mail: miyangmi@163.com

申 杰(1998—), 男, 通信作者, 硕士研究生, 研究方向为主动配电网优化调度等。E-mail: shenjie9807@163.com

(编辑 周金梅)