

DOI: 10.16513/j.2096-2185.DE.25100037

# 计及新能源无功潜力的虚拟电厂无功优化运行

陶泽飞<sup>1</sup>, 刘 敏<sup>1</sup>, 刘文霞<sup>2</sup>

(1. 贵州大学电气工程学院, 贵州省 贵阳市 550025;

2. 贵州电网有限责任公司电网规划研究中心, 贵州省 贵阳市 550001)

**摘要:** 随着“双碳”战略的深入推进, 虚拟电厂(virtual power plant, VPP)在整合和调度新能源方面展现出显著优势, 深入挖掘新能源在无功支持领域的巨大潜力是提升VPP运行经济性的有效手段之一。首先, 构建了一套计及有功出力 and 逆变器约束的新能源无功容量评估体系。其次, 为提升无功优化模型的求解速度, 针对有功网损和潮流约束的非线性特性, 提出基于潮流迭代的有功网损估计方法和基于变量空间优化选择的潮流线性化方法; 并构建了计及新能源无功潜力和基于变量空间优化选择的VPP线性潮流无功优化模型。最后, 以改进IEEE 33节点主动配电系统为例, 验证了所提模型的有效性。结果表明: VPP充分利用新能源无功支持能力时, 系统电压偏差减少0.673 pu, 运行成本减少1 254.9元。

**关键词:** 新能源; 虚拟电厂; 无功优化; 线性潮流; 网损估计

中图分类号: TK 01; TM 73

文献标志码: A

## Reactive Power Optimization Operation of Virtual Power Plant Considering Reactive Power Potential of New Energy Sources

TAO Zefei<sup>1</sup>, LIU Min<sup>1</sup>, LIU Wenxia<sup>2</sup>

(1. College of Electrical Engineering, Guizhou University, Guiyang 550025, Guizhou Province, China;

2. Power Grid Planning & Research Center, Guizhou Power Grid Co., Ltd., Guiyang 550001, Guizhou Province, China)

**ABSTRACT:** With the in-depth promotion of the strategy of "carbon peak and carbon neutrality", virtual power plant (VPP) has shown significant advantages in integrating and dispatching new energy. It is one of the effective means to improve the operation economy of VPP to deeply tap the huge potential of new energy in the field of reactive power support. Firstly, a set of new energy reactive power capacity evaluation system considering active power output and inverter constraints was constructed. Secondly, in order to improve the solving speed of the reactive power optimization model, according to the nonlinear characteristics of active network loss and power flow constraints, an active network loss estimation method based on power flow iteration and a power flow linearization method based on variable space optimization selection were proposed. A VPP linear power flow reactive power optimization model considering the reactive power potential of new energy sources and based on variable space optimization selection was constructed. Finally, the improved IEEE 33-node active distribution system was taken as an example to verify the effectiveness of the proposed model. The results show that when VPP makes full use of the reactive power support ability of new energy, the system voltage deviation is reduced by 0.673 pu, and the operating cost is reduced by 1 254.9 yuan.

**KEY WORDS:** new energy; virtual power plant; reactive power optimization; linear power flow; power loss estimation

## 0 引言

在“双碳”战略的背景下, 可为环境带来巨大福利的可再生能源迅猛发展, 但也给电力系统带来极大的不确定性和运行风险。虚拟电厂(virtual power plant, VPP)作为一种新兴的市场主体, 在增

**基金项目:** 中国南方电网有限责任公司重点科技项目  
(067600KK52222008)

This work is supported by Key Scientific and Technological  
Project Funding of China Southern Power Grid Co., Ltd.  
(067600KK52222008)

强电网可靠性、提升电力系统运行效率、挖掘需求响应潜力、促进新能源消纳、推动电力市场发展等方面具有显著成效<sup>[1-2]</sup>。

VPP在聚合和调度可再生能源方面优势显著,已有大量学者对此展开了研究<sup>[3-7]</sup>。然而,高比例新能源的注入也给VPP电压和无功控制带来巨大挑战,诸如静止无功补偿器(static var compensator, SVC)、分组投切电容器组(capacitor banks, CB)、变压器变比调节等传统的电压控制方法不足以快速、有效的处理这些由新能源功率快速波动引起的电压问题<sup>[8]</sup>。配备智能逆变器的新能源机组在控制机组响应方面具有灵活、快速的优点,为VPP电压和无功控制提供了一种经济高效的解决方案<sup>[9-10]</sup>。

目前,已有部分学者关注新能源机组在无功优化方面的潜力<sup>[11]</sup>,文献<sup>[12]</sup>分析了新能源机组有功功率与无功功率之间的耦合关系,提出了主动降有功的无功调节范围模型,建立了考虑新能源电站有功的无功优化模型。文献<sup>[13]</sup>考虑风速变化对风机有功和无功的影响,并通过两阶段评估方法评估风电场的可信无功容量区间。文献<sup>[14]</sup>分析了光伏电站的逆变器无功容量和技术要求,并根据相关技术标准对某实际光伏电站的无功能力进行了评估。文献<sup>[15]</sup>考虑了通过逆变器接入系统的分布式能源无功能力,提出了一种基于两阶段随机能量管理的孤立微电网日前最优调度决策方法。

电力系统中,无功优化模型除需考虑有功、无功、电压幅值和电压角度之间的非线性耦合关系外,还要考虑系统复杂的约束条件,这将会导致模型求解计算量大,甚至潮流不收敛,因此,如何高效求解新能源高比例接入的无功优化问题,仍是需要解决的难题。文献<sup>[8]</sup>利用长短期记忆(long short-term memory, LSTM)辅助交替方向乘数法(alternating direction method of multipliers, ADMM)来加速模型求解;应用LSTM技术学习电压无功控制问题的收敛过程,并将收敛值与基于ADMM的收敛观测值进行回归,再利用回归值更新ADMM的参数,以加速模型求解速度。文献<sup>[16]</sup>提出一种改进ADMM算法来求解配电网电压无功优化模型。根据ADMM算法,将模型分解为多个优化模块,以级联方式迭代求解,直至收敛,通常需要迭代3~5次才能收敛。文献<sup>[17]</sup>提出了一种考虑风光集成的新的概率多目标无功优化模型,并采用一种两阶段多目标进化算法对模型进行求解,该算法综

合了可行性约束处理的优越性,有效地解决了无功优化问题。文献<sup>[18]</sup>利用凸松弛技术将主动配电网无功优化模型转换为含离散变量的混合整数二阶锥规划模型,通过二阶锥规划对优化模型进行求解。

综上所述,尽管新能源在无功支持领域的巨大潜力已受到广泛关注,且众多学者也深入探索了配电网无功优化模型的多种求解方法,但在新能源无功能力应用于VPP无功优化运行时,依然面临着以下关键性的挑战:

(1)在VPP中,随着新能源渗透率的不断提高,为了进一步提升运行的经济性,有必要更深入地挖掘新能源机组在无功支持方面的潜力,并全面分析其对VPP运行稳定性及经济性的综合影响。

(2)尽管当前已有文献将优化算法及机器学习等方法应用于无功优化模型的求解,但当新能源大规模参与无功优化时,优化算法的求解效率以及机器学习模型所需训练数据的获取仍然面临诸多困难。因此,迫切需要开发出更为便捷、高效的模型求解策略。

针对问题(1),本文首先构建一套基于有功功率及逆变器运行约束的新能源无功潜力评估模型,为VPP无功优化提供可靠的容量参数依据。随后,通过算例对比分析,深入探讨新能源无功支持能力对VPP运行经济性和电压稳定性的影响。

针对问题(2),本文在传统模型的基础上,创新性地提出计及新能源无功潜力和基于变量空间优化选择的线性潮流无功优化模型。同时,针对有功网损的非线性特性,本文还提出一种基于潮流迭代的有功网损估计方法。最终,本文将优化问题划分为潜力评估和整体优化2个阶段,利用Matlab商业求解器GUROBI进行求解,有效解决优化算法求解速度慢及机器学习需大量数据的问题。

## 1 虚拟电厂结构及其无功潜力评估

文中VPP聚合光伏发电机组、风力发电机组、储能系统、燃气轮机、需求响应、静止无功补偿器及分组投切电容器组等作为一个整体参与电力市场,区域内负荷由各分布式能源及上级电网供应(VPP框架见图1)。

### 1.1 燃气轮机无功出力潜力

文中所涉及燃气轮机忽略其供热能力,其无功输出可表示为

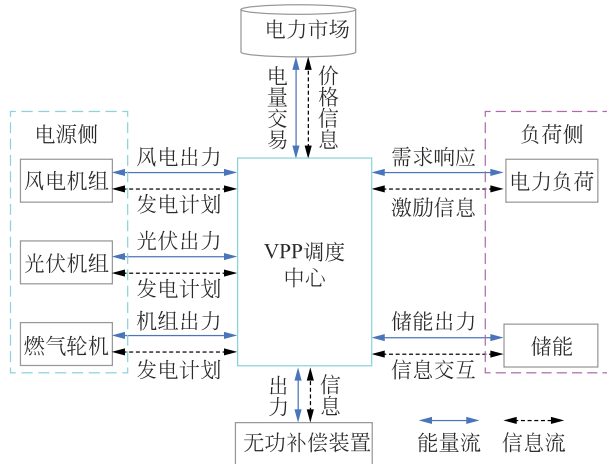


图1 VPP框架

Fig. 1 VPP framework

$$Q_{gs} = \sqrt{S^2 - P_g^2} \quad (1)$$

式中:  $Q_{gs}$  为考虑视在功率约束的燃气轮机无功出力;  $S$  为视在功率;  $P_g$  为燃气轮机有功功率。

在实际应用中,火电机组通常被设计为具有较高的功率因数,以保证电网的稳定运行和电能的高效利用。假设燃气轮机功率因数  $\delta$  的取值区间为  $[0.80, 0.95]$ , 则其无功输出可表示为

$$Q_{g\delta} = P_g \tan(\cos^{-1} \delta) \quad (2)$$

式中  $Q_{g\delta}$  为功角约束下燃气轮机无功出力。

因此燃气轮机无功潜力可表示为

$$Q_g = \min(Q_{gs}, Q_{g\delta}) \quad (3)$$

## 1.2 新能源无功出力潜力评估

### 1.2.1 风电机组

常规的风电机组有直驱式风电机组(direct driven wind turbine, DDWT)及双馈风电机组(doubly fed induction generator, DFIG), 直驱式风电机组通过逆变器直接将定子与电网相连, 依靠定子传输功率<sup>[12]</sup>; 而双馈异步风电机组的发电机定子直接接入电网, 其转子通过逆变器与电网相连, 因此双馈机组通过定子端和转子端与电网进行功率交换<sup>[19]</sup>。

(1) 定子侧无功潜力。

双馈风机定子侧无功输出能力主要受转子侧逆变器的电流限制, 考虑其极限电流的定子侧无功潜力可表示为

$$\begin{cases} Q_{wd} = -\frac{3u_d^2}{2X_d} + \sqrt{\left(\frac{3X_m}{2X_d}u_d I_{zmax}\right)^2 - P_d^2} \\ P_d = \frac{P_{wt}}{1+s} \end{cases} \quad (4)$$

式中:  $Q_{wd}$  为定子侧无功出力;  $u_d$  为定子电压幅值;  $X_d$

为定子电抗;  $X_m$  为励磁电抗;  $I_{zmax}$  为转子侧逆变器极限电流;  $P_d$  为定子侧传递到电网的有功功率;  $P_{wt}$  为风电机组总的有功输出;  $s$  为风机转差率。

(2) 转子侧无功潜力。

转子侧无功功率一般由逆变器容量决定, 转子侧的无功出力可表示为

$$Q_{wtzs} = \sqrt{S_z^2 - (sP_d)^2} \quad (5)$$

式中:  $Q_{wtzs}$  为转子侧视在功率约束下的转子侧无功出力;  $S_z$  为电网侧逆变器容量, 按风电系统的最大转差率设计。

考虑到网侧逆变器的安全运行要求, 转子侧无功出力还需满足逆变器最大电压电流限制, 其电压电流约束可表示为

$$\begin{cases} P_s^2 + Q_{wtz}^2 \leq u_{wt}^2 I_{cmax}^2 \\ P_s^2 + \left(Q_{wtz} + \frac{u_{wt}^2}{X_c}\right)^2 \leq \frac{u_{cmax}^2 u_{wt}^2}{X_c^2} \\ P_s = sP_d \end{cases} \quad (6)$$

式中:  $P_s$  为转子侧传递到电网的有功功率;  $Q_{wtz}$  为转子侧无功出力;  $u_{wt}$  为风机配电网馈线电压;  $I_{cmax}$  为网侧逆变器输出的极限电流;  $X_c$  为逆变器和电网的滤波电抗;  $u_{cmax}$  为网侧逆变器输出极限电压。

在2个圆形约束下其转子侧无功潜力为

$$\begin{cases} Q_{wtz-V} = \sqrt{\frac{u_{cmax}^2 u_{wt}^2}{X_c^2} - P_s^2} - \frac{u_{wt}^2}{X_c} \\ Q_{wtz-I} = \sqrt{u_{wt}^2 I_{cmax}^2 - P_s^2} \end{cases} \quad (7)$$

(3) 综合考虑风电机组有功出力及逆变器约束的无功潜力可表示为

$$Q_{wt} = Q_{wd} + \min(Q_{wtzs}, Q_{wtz-V}, Q_{wtz-I}) \quad (8)$$

### 1.2.2 光伏机组

光伏机组直接通过逆变器与电网相连, 其无功出力主要受逆变器容量及电压电流限值决定<sup>[12,20]</sup>, 即有

$$\begin{cases} Q_{pvs} = \sqrt{S_{pv}^2 - P_{pv}^2} \\ Q_{pv-V} = \sqrt{\frac{u_{cmax}^2 u_{pv}^2}{X_c^2} - P_{pv}^2} - \frac{u_{pv}^2}{X_c} \\ Q_{pv-I} = \sqrt{u_{pv}^2 I_{cmax}^2 - P_{pv}^2} \end{cases} \quad (9)$$

式中:  $Q_{pvs}$  为逆变器容量限制下的无功功率;  $S_{pv}$  为光伏逆变器容量;  $P_{pv}$  为光伏传递到电网的有功功率;  $u_{pv}$  为光伏配电网馈线电压;  $Q_{pv-V}$  和  $Q_{pv-I}$  分别为考虑逆变器电压和电流限制下的光伏机组无功能力。

故综合考虑光伏机组有功出力及逆变器约束

的无功潜力可表示为

$$Q_{pv} = \min(Q_{pvs}, Q_{pv-v}, Q_{pv-1}) \quad (10)$$

### 1.3 储能

储能种类丰富,一般应用于电力系统中的储能多为电化学储能中的电池储能,因此文中主要针对电池化学储能建立模型分析其无功潜力,储能逆变器的四象限运行如图2所示。

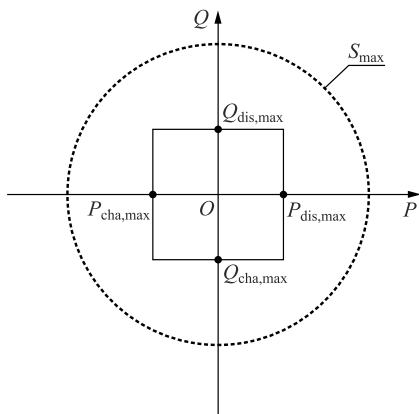


图2 储能四象限运行图

Fig. 2 Four-quadrant operation diagram of energy storage

图2中圆形为功率限制,矩阵为储能充放电限制;当系统中缺乏有功和无功时,其运行于第一象限,同时发出有功和无功;当系统中有功和无功较充裕时,其运行在第四象限,同时吸收有功和无功<sup>[21]</sup>;也可根据系统要求运行于第二、四象限及坐标轴上,考虑到储能频繁充放电影响其使用寿命,文中仅考虑储能运行于第一、三象限及其坐标轴情况。

由于储能装置在电能充裕时充电,不足时放电的特点,故其放出无功能力主要受电池电量及放电能力限制,吸收无功主要受容量及充电能力限制。

$$\begin{cases} E_{ess}(t) = E_{ess}(t-1) + \delta_p(t)\eta P_{bat}(t) - \delta_q(t)\eta Q_{bat}(t) \\ \delta_p(t) + \delta_q(t) \leq 1 \\ P_{bat}(t) \leq e \\ Q_{bat}(t) \leq e \end{cases} \quad (11)$$

式中: $E_{ess}(t)$ 为 $t$ 时刻电池电量; $\delta_p(t)$ 、 $\delta_q(t)$ 为 $t$ 时刻储能有功、无功出力状态,为0-1变量; $\eta$ 为储能充放电效率; $P_{bat}(t)$ 、 $Q_{bat}(t)$ 为 $t$ 时刻储能发出的有功和无功; $e$ 为充放电限值。

### 1.4 柔性负荷

文中假设区域内部分负荷为可中断柔性负荷,可参与需求响应,假设可参与响应的负荷比例为 $\beta$ ,

参与响应的负荷响应系数为 $\lambda$ ,则可参与需求响应的无功负荷为

$$L_{dr} = L_{load}\beta\lambda \quad (12)$$

式中: $L_{dr}$ 为参与响应的无功负荷; $L_{load}$ 为总无功负荷。

## 2 VPP线性潮流优化模型

### 2.1 线性潮流变量空间优化选择

无功电压优化控制是确保电网安全稳定运行的关键基石<sup>[22]</sup>,潮流计算是电力系统无功电压优化控制的基础;最优潮流(optimal power flow, OPF)可有效降低VPP发电成本和网络损耗,传统交流潮流方程可表示为状态变量 $v$ 和 $\theta$ 的非线性函数,即有

$$\begin{cases} p_{ij} = g_{ij}(v_i^2 - v_i v_j \cos \theta_{ij}) - b_{ij} v_i v_j \sin \theta_{ij} \\ q_{ij} = -b_{ij}(v_i^2 - v_i v_j \cos \theta_{ij}) - g_{ij} v_i v_j \sin \theta_{ij} \end{cases} \quad (13)$$

式中: $p_{ij}$ 、 $q_{ij}$ 分别为流过节点 $i$ 、 $j$ 之间的有功和无功功率; $v_i$ 为节点 $i$ 的电压幅值; $\theta_{ij}$ 、 $g_{ij}$ 、 $b_{ij}$ 分别为节点 $i$ 、 $j$ 间的电压相位差、电导和电纳。

尽管传统的交流潮流方程可以得到精确的结果,但其非线性导致了OPF问题的非凸性,再加上配备电力电子设备的新能源大量接入,VPP运行优化模型的非线性和非凸性急剧增加,这给模型的求解带来了巨大的计算挑战。为了满足潮流收敛性和模型计算速度的要求,对交流潮流模型进行线性化是一种有效的解决方案。

文中使用自变量的一般公式, $\varphi(v)$ 表示与 $v$ 相关的自变量, $\xi(\theta)$ 表示与 $\theta$ 相关的自变量;则 $v = \varphi^{-1}(\varphi(v))$ , $\theta = \xi^{-1}(\xi(\theta))$ ,故以 $\varphi(v)$ 和 $\xi(\theta)$ 为自变量的线性潮流模型<sup>[23]</sup>可表示为

$$\begin{cases} p_{ijL}(\varphi(v), \xi(\theta)) = p_{ij}(\varphi^{-1}(\varphi(v)), \xi^{-1}(\xi(\theta))) \\ q_{ijL}(\varphi(v), \xi(\theta)) = q_{ij}(\varphi^{-1}(\varphi(v)), \xi^{-1}(\xi(\theta))) \end{cases} \quad (14)$$

取 $\varphi(v) = v^k$ , $\xi(\theta) = \theta$ ,与文献[23]不同的是针对所有节点其 $k$ 取同一常数,而文中针对不同节点使用不同的 $k_i$ 值,则 $\varphi(v) = v^{k_i}$ , $\xi(\theta_{ij}) = \theta_{ij}$ 。使用 $\varphi(v_i)$ 作为自变量对 $v_i^2$ 进行线性化,可将其在 $v_{i0}$ 处泰勒展开为

$$v_i^2 \approx v_{i0}^2 + 2v_{i0} \frac{\partial v_i}{\partial \varphi(v_i)} (\varphi(v_i) - \varphi(v_{i0})) = v_{isl} \quad (15)$$

取 $v_{i0} = 1$ ,将 $\varphi(v_i) = v_i^{k_i}$ 带入式(15)得

$$v_{isl} = 1 + \frac{2}{k_i} (v_i^{k_i} - 1) \quad (16)$$

同理

$$v_i v_j \approx \frac{v_i^{k_i}}{k_i} + \frac{v_j^{k_j}}{k_j} + 1 - \frac{1}{k_i} - \frac{1}{k_j} = v_{ij\text{cpl}} \quad (17)$$

故线性化潮流模型可表示为

$$\begin{cases} p_{ijL} = g_{ij} \left( \frac{v_i^{k_i} - 1}{k_i} - \frac{v_j^{k_j} - 1}{k_j} \right) - b_{ij} \theta_{ij} \\ q_{ijL} = -b_{ij} \left( \frac{v_i^{k_i} - 1}{k_i} - \frac{v_j^{k_j} - 1}{k_j} \right) - g_{ij} \theta_{ij} \end{cases} \quad (18)$$

式中: $p_{ijL}$ 和 $q_{ijL}$ 分别为支路 $ij$ 的线性化有功功率和无功功率。

构建线性化误差最小的变量空间优化选择模型:

$$f = \min_{i,j \in \Lambda} (|p_{ij} - p_{ijL}| + |q_{ij} - q_{ijL}|) \quad (19)$$

约束条件包括式(13)(18),变量为 $k_i, i = 1, 2, 3, \dots; \Lambda$ 为网络节点集合。

将优化结果 $k_i$ 带入式(18)即可求解线性化潮流表达式,并且变量空间 $\varphi(v), \xi(\theta)$ 的优化求解将在线下进行,可大量节约无功优化模型求解时间。

## 2.2 计及新能源无功潜力和基于变量空间优化选择的VPP线性潮流优化模型

电力系统的无功优化问题一般可统一描述为

$$\begin{cases} \min(f(v, x)) \\ \text{s.t.} \begin{cases} g(v, x) = 0 \\ h(v, x) \leq 0 \end{cases} \end{cases} \quad (20)$$

式中: $v$ 为控制变量,包括各无功源无功出力、平衡节点电压模值等; $x$ 为状态变量,包括平衡节点外各节点电压相角及模值; $f(v, x)$ 为目标函数; $g(v, x)$ 为等式约束; $h(v, x)$ 为不等式约束。

### 2.2.1 具体模型目标函数

兼顾VPP系统稳定性及经济性,本文目标函数为VPP电压偏差及无功成本加权<sup>[24]</sup>最小,即

$$f = \min(AD + B(C_g + C_{\text{SVC-CB}} + C_{\text{op}})) \quad (21)$$

式中: $A, B$ 为权重系数; $D$ 为电压偏差; $C_g, C_{\text{SVC-CB}}, C_{\text{op}}$ 分别为燃气轮机、SVC及CB、风光储的无功成本,其表达式为

$$\begin{cases} D = \text{abs}(u - u_N) \\ C_g = a \sin^2 \theta Q_g + b \sin \theta Q_g + c \sin \theta \\ C_{\text{SVC-CB}} = \frac{Q_{\text{cap}} C_c}{LU} (Q_{\text{SVC}} + Q_{\text{CB}}) \\ C_{\text{op}} = \omega_0 Q_{\text{wt}} + \omega_1 Q_{\text{pv}} + \omega_2 Q_{\text{bat}} \end{cases} \quad (22)$$

式中: $u_N$ 为参考电压; $a, b, c$ 为燃气轮机成本系数; $\theta$ 为电压相位角; $Q_{\text{cap}}$ 为SVC、CB安装容量; $Q_{\text{SVC}}, Q_{\text{CB}}$

分别为SVC和CB无功出力; $C_c$ 为单位投资成本; $L$ 为寿命; $U$ 为利用率; $\omega_0, \omega_1, \omega_2$ 分别为风、光、储维护成本。

### 2.2.2 约束条件

VPP等式约束包括功率平衡、潮流平衡等,可表示为

$$\begin{cases} \sum_{i \in \Lambda} P_{i,G} - P_{i,\text{load}} = \sum_{j \in \Lambda} (p_{ij} + P_{ij,\text{loss}}) \\ \sum_{i \in \Lambda} Q_{i,G} - Q_{i,\text{load}} = \sum_{j \in \Lambda} q_{ij} - (\sum_{j \in \Lambda} b_{ij}) u_i^2 \\ P_{ij,\text{loss}} = \frac{p_{ij}^2 + q_{ij}^2}{u_i^2} R \\ p_{ij} = g_{ij} (u_i^2 - u_i u_j \cos \theta_{ij}) - b_{ij} u_i u_j \sin \theta_{ij} \\ q_{ij} = -b_{ij} (u_i^2 - u_i u_j \cos \theta_{ij}) - g_{ij} u_i u_j \sin \theta_{ij} \end{cases} \quad (23)$$

式中: $P_{i,G}, Q_{i,G}$ 为节点 $i$ 的有功功率、无功功率,包括燃气轮机、风电、光伏、储能、SVC、CB; $P_{ij,\text{loss}}$ 为线路有功网损。

VPP不等式约束包括线路电压电流约束、无功补偿装置约束<sup>[25]</sup>等,可表示为

$$\begin{cases} I_{\min} \leq I_{ij} \leq I_{\max} \\ u_{\min} \leq u_{ij} \leq u_{\max} \\ Q_{\text{SVCmin}} \leq Q_{\text{SVC}} \leq Q_{\text{SVCmax}} \\ Q_{\text{CB}}(t) = y_{\text{CB}}(t) Q_{\text{CB,step}} \\ y_{\text{CB}}(t) \leq Y_{\text{CB,max}} \\ \sum_{t \in T} |y_{\text{CB}}(t) - y_{\text{CB}}(t-1)| \leq N_{\text{CB,max}} \end{cases} \quad (24)$$

式中: $y_{\text{CB}}(t)$ 为 $t$ 时刻CB投运组数; $Q_{\text{CB,step}}$ 为每组CB补偿功率; $Y_{\text{CB,max}}$ 投运组数上限; $N_{\text{CB,max}}$ 为操作次数上限。

文中在传统无功优化模型的基础上充分考虑新能源无功支持能力,并且为加速模型求解,采用变量空间优化选择的线性化潮流约束式(18)替代等式约束中潮流平衡约束,最终结合式(1)——(12)(18)(21)——(24)构成计及新能源无功潜力和基于变量空间优化选择的VPP线性潮流优化模型。

## 3 模型求解

由第2节VPP优化模型可见,模型的求解还具有很大的难度,其非线性主要来自于新能源机组无功潜力评估模型及网损函数。故为加快求解速度,文中将优化问题分为两阶段求解,并提出基于潮流迭代的有功网损估计法,求解流程如图3所示。

### 3.1 优化问题分段求解

文中将优化问题分为潜力评估阶段及整体优

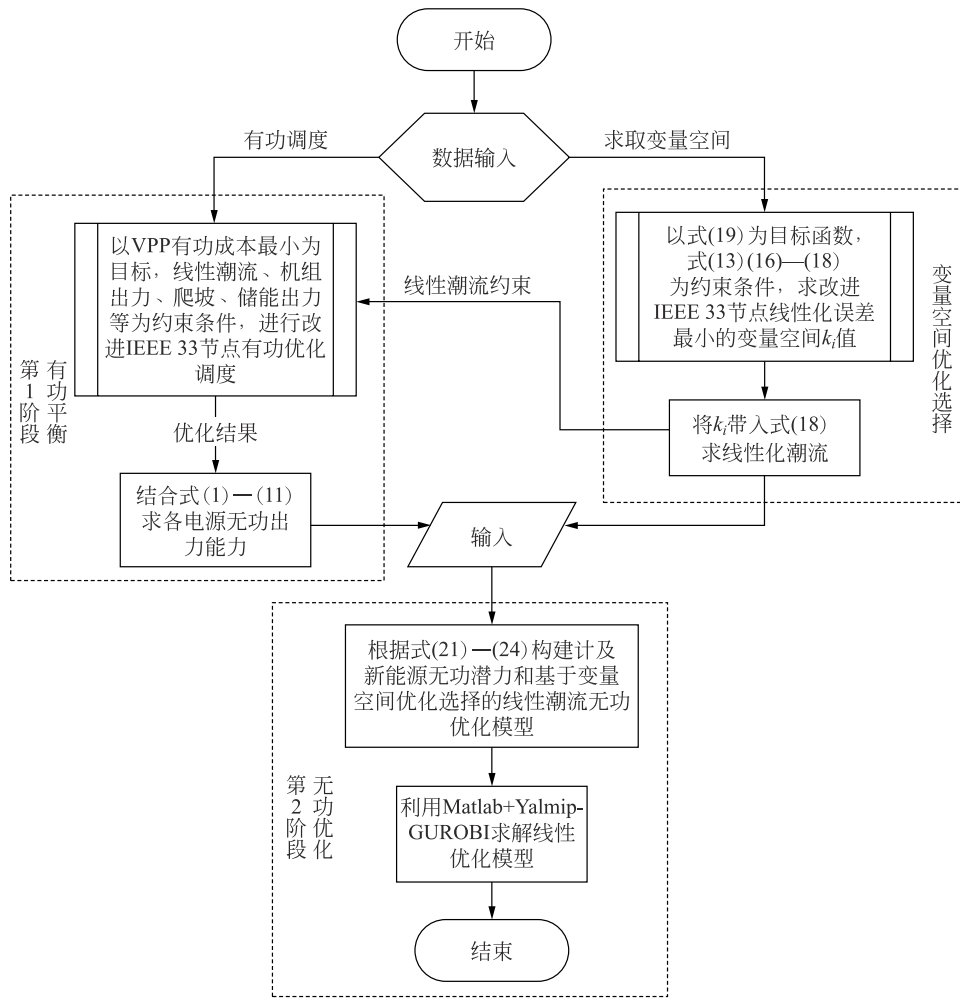


图3 VPP无功优化求解流程图

Fig. 3 VPP reactive power optimization solution flowchart

化阶段。第1阶段,主要进行VPP有功功率平衡,并将优化结果带入式(1)~(11)得到包括风光等各无功源的无功支持潜力。其中,有功优化部分非本文重点论述内容,不作详细展开,有功优化模型为

$$f = \min(C_g + C_{op} + C_{bs}) \quad (25)$$

$$\begin{cases} C_g = aP_{i,G}^2 + bP_{i,G} + c + \delta_{Gs}C_{Gs} + \delta_{Gt}C_{Gt} \\ C_{op} = \omega_{wt}P_{wt} + \omega_{pv}P_{pv} + \omega_{bat}P_{bat} \\ C_{bs} = C_{buy}P_{net}\Delta t \\ P_{G,min} \leq P_{i,G} \leq P_{G,max} \\ -P_c \leq P_{i,G}(t+1) - P_{i,G}(t) \leq P_c \\ \delta_{Gs} + \delta_{Gt} \leq 1 \end{cases} \quad (26)$$

式中: $C_g$ 、 $C_{op}$ 、 $C_{bs}$ 分别为燃气轮机有功出力成本、风光储有功运行成本、VPP购电成本; $\delta_{Gs}$ 、 $\delta_{Gt}$ 为布尔变量,表示机组启停状态; $C_{Gs}$ 、 $C_{Gt}$ 分别为机组启停费用; $\omega_{wt}$ 、 $\omega_{pv}$ 、 $\omega_{bat}$ 分别为风光储运维成本系数; $P_{G,max}$ 、 $P_{G,min}$ 分别为机组出力的上、下限; $P_c$ 为机组爬坡率。

在进行有功平衡时,VPP无功负荷由燃气轮

机、SVC和CB供应,且优化过程无功仅考虑潮流约束及功率平衡约束,不考虑电压偏差及无功成本;然后再利用优化结果评估各无功源无功潜力,为第2阶段无功优化做数据支撑。

第2阶段主要利用第1阶段所得结果结合第2节所建模型作VPP整体无功优化。

### 3.2 有功网损估计

电力系统中,线路的运行状况随时间改变,线路上的功率损耗也随时间而变化,若线路电流或某一段电压和有功、无功变化规律已知,则线路网损可计算<sup>[26-29]</sup>。式(23)中网损公式描述了有功网损与电压、有功、无功之间的非线性关系,其线性化难度较大,故文中在进行优化时假设线路网损为输送有功的 $f\%$ ,然后优化VPP各电源有功出力,再以结果为数据输入,利用牛顿-拉夫逊法迭代计算线网损及线损的估计误差。最终通过不断循环迭代求得估计误差最小时线损占比 $\alpha$ ,从而实现网损线性化。

## 4 算例分析

### 4.1 算例描述

文中采用改进 IEEE 33 节点进行分析,在基础网络上添加了燃气轮机、ESS、SVC、CB 以及风光等单元,燃气轮机、储能、风光参数参考文献[30],SVC、CB 参数参考文献[31],各单元接入系统位置如表1所示。

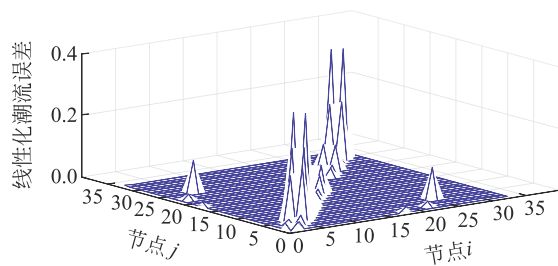
表1 各单元接入系统位置

Table 1 Location of units accessing the system

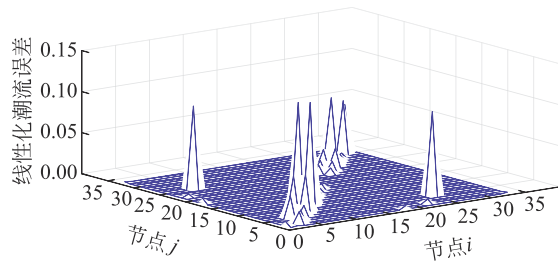
| 电源   | 接入节点  |
|------|-------|
| 燃气轮机 | 5     |
| 储能   | 15,32 |
| 风电   | 15    |
| 光伏   | 32    |
| CB   | 31    |
| SVC  | 17    |

### 4.2 变量空间优化选择

当新能源作为可同时提供有功和无功的电源接入 VPP 时,随着其网络拓扑及电源的变化,其潮流分布也会发生改变,进行潮流线性化时应当针对不同的网络拓扑及电源结构优化求解不同的变量空间。文中以改进 IEEE 33 节点新能源提供无功支持时的网络参数及电压数据为输入优化求取该网架下各节点对应的  $k_i$ ,利用海鸥优化算法求解,种群数量取 200,迭代次数取 20;相较于文献[23],文中针对不同节点求取不同  $k_i$ ,线性化误差对比如图4所示。



(a) 所有节点的  $k_i$  值相同



(b) 不同节点选取不同的  $k_i$  值

图4  $k_i$  值对线性潮流误差的影响

Fig. 4 Influence of  $k_i$  on linear power flow error

优化结果显示,不同节点选取不同  $k_i$  值时线性潮流平均误差为 0.039 059,所有节点取相同值平均误差为 0.137 040,针对同一配网系统,采用文中所提方法平均线性化潮流误差可降低 9.7981%。

### 4.3 有功平衡及网损估计

假设线路网损为输送有功的  $\alpha$  倍,优化 VPP 有功出力,并将优化结果带入第1节所搭模型计算各电源无功支持潜力;最终迭代计算结果显示,当  $\alpha=0.025$  时,估计误差最小(网损估计误差如图5所示,此时各电源有功出力如图6所示)。图中电源  $P_g$ 、 $P_{net}$ 、 $P_{wt}$ 、 $P_{pv}$ 、 $P_{dis1}$ 、 $P_{cha1}$ 、 $P_{dis2}$ 、 $P_{cha2}$  分别表示燃气轮机有功出力、上级电网购电功率、风电出力、光伏出力、1号储能放电、1号储能充电、2号储能放电、2号储能充电。

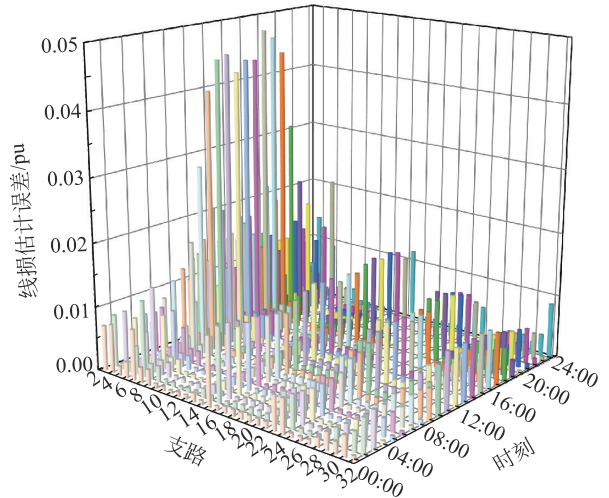


图5 线路网损估计误差

Fig. 5 Line network loss estimation error

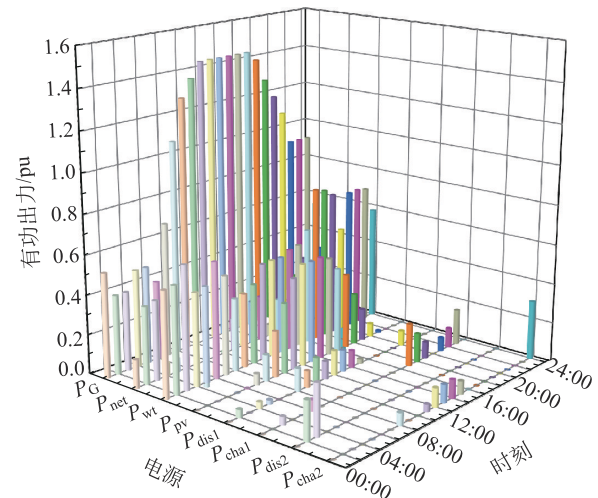


图6 改进 IEEE 33 节点有功优化结果

Fig. 6 Improved active power optimization results of IEEE 33 node system

#### 4.4 VPP整体无功优化

以第一阶段优化结果为数据输入,结合第2节所建模型,利用Matlab+Yalmip-GUROBI即可对模型进行快速准确求解。为比较文中所提方法的求解速度和寻优能力,除文中所提方法外特采用牛顿-拉夫逊潮流计算与常规优化算法结合求解模型。

此外,为分析优化算法求解无功优化模型的局限性,分别选取粒子群优化算法(particle swarm optimization, PSO)及海鸥优化算法(seagull optimization algorithm, SOA)与牛顿-拉夫逊潮流法结合求解模型;并设置对比案例如下:

(1)分析不同种群及迭代次数对优化算法求解速度和结果的影响,设置SOA种群分别为10、30、50、100,迭代次数分别为5、10、20时,得出模型求解结果如图7所示。

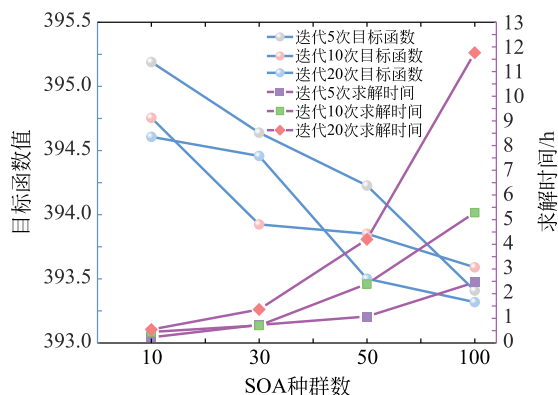


图7 SOA算法的求解结果

Fig. 7 Solution results of SOA algorithm

(2)分析不同优化算法对求解结果及速度的影响,文中设置迭代次数为10,种群数量分别为10、30、50、100时,分别采用PSO及SOA求解,结果如图8所示。

针对同一算法,迭代次数及种群数越大,其寻优能力越好,即其电压偏差与运行成本越小,但是其求解所需时间也飞速增长。由图7可知:种群为30时,迭代20次比迭代10次目标函数更大,分析其原因可能是陷入局部最优,故算法求解要想得到较好的寻优结果需要耗费大量时间,且有可能陷入局部最优。而由图8可见:与PSO相比,SOA寻优能力更好,但其速度提升不明显,仍需大量求解时间。因此利用算法求解VPP无功优化问题时,通过选取较合适的算法大幅度提升其速度仍然很困难。

但若采用本文所提方法,其建模时间仅需18.196 213 s,求解时间仅需27.210 412 s,求解结

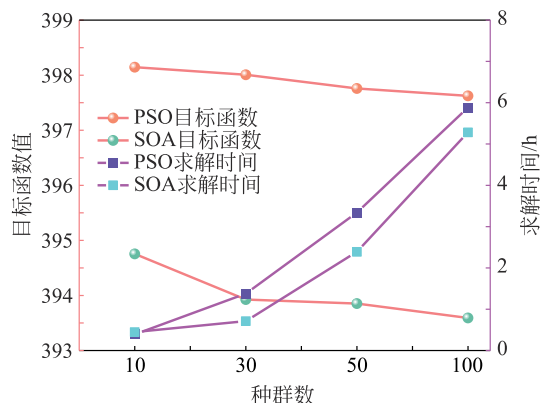


图8 SOA、PSO算法求解结果对比

Fig. 8 Comparison of the results of SOA and PSO algorithms

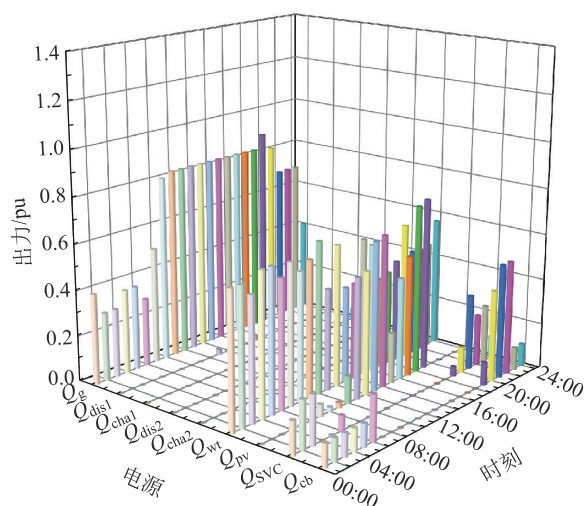
果为368.506 65,所有节点24 h电压偏差之和为35.105 1 pu,运行成本为58.185 5千元。与其他优化算法求解结果及时间相比,其寻优能力和求解速度都大幅提升,即使存在图7所示的潮流误差也是可以接受的。

最后,为分析分布式能源参与无功优化是否改善VPP运行效益及电压稳定性,文中在以上案例的基础上假设VPP忽略风、光无功支持能力,即设风光无功出力为0,对比各单元出力结果如图9所示。

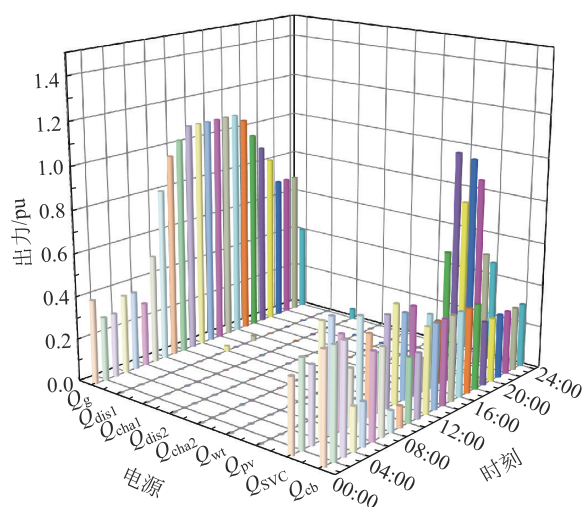
由图9可知:当配备逆变器的新能源不参与VPP无功优化时,为满足负荷需求,燃气轮机在负荷高峰10:00—15:00无功出力增加,CB和SVC无功出力在整个调度周期内都增加;并且由图9(a)可以看出,当考虑新能源无功潜力时,SVC和CB仅在夜间提供无功支持,以补偿光伏夜间无出力的情况。相对而言储能主要参与VPP有功平衡(见图9(b)),其无功出力很少,并且变化不大;最终的优化结果显示,若忽略新能源无功潜力,模型目标函数会增加7.106 47,其中整个调度周期内电压偏差增加0.673 pu,运行费用增加1 254.9元,故对于VPP而言,充分利用新能源的无功支持能力可提升其运行的经济性和电压质量。

## 5 结论

为充分挖掘新能源的无功支持潜力,进一步改善VPP的运行经济性,文中考虑了新能源配备逆变器时的无功支持能力,构建了基于有功出力和逆变器运行约束的新能源无功容量评估体系;其次,为解决无功优化模型求解困难的问题,文中提出计及新能源无功潜力和基于变量空间优化选择的线性



(a) 计及新能源无功



(b) 未考虑新能源无功

图9 新能源无功出力对VPP无功出力的影响

Fig. 9 Influence of new energy reactive power output on VPP reactive power output

潮流无功优化模型,并针对有功网损的非线性特性,提出了基于潮流迭代的有功网损估计方法,最后通过算例结果表明:

(1)相较于新能源仅参与有功平衡,充分利用其无功支持能力可减少VPP运行成本,提高其电压稳定性。

(2)在损失部分可接受的潮流计算精度的前提下,文中所提方法能大幅提升VPP无功优化模型求解速度;更为关键的是,该方法无需像机器学习那样依赖于大量的历史数据。

## 参考文献

[1] 康重庆,陈启鑫,苏剑,等. 新型电力系统规模化灵活资源虚

拟电厂科学问题与研究框架[J]. 电力系统自动化, 2022, 46(18): 3-14.

KANG Chongqing, CHEN Qixin, SU Jian, et al. Scientific problems and research framework of virtual power plant with enormous flexible distributed energy resources in new power system [J]. Automation of Electric Power Systems, 2022, 46(18): 3-14.

[2] 吴垠,牛文娟,诸晓骏. 考虑不同场景的虚拟电厂建模与优化分析[J]. 电测与仪表, 2024, 61(11): 40-45.

WU Yin, NIU Wenjuan, ZHU Xiaojun. Modeling and optimization analysis of virtual power plant considering different scenarios [J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2024, 61(11): 40-45.

[3] GAO H, JIN T, WANG G, et al. Low-carbon dispatching for virtual power plant with aggregated distributed energy storage considering spatiotemporal distribution of cleanliness value [J]. Journal of Modern Power Systems and Clean Energy, 2024, 12(2): 346-358.

[4] 钟荣豪,张亚超,朱蜀,等. 基于电-碳点对点交易的虚拟电厂联盟与配电网协同低碳运行策略研究[J]. 电网技术, 2024, 48(9): 3554-3563.

ZHONG Ronghao, ZHANG Yachao, ZHU Shu, et al. Research on collaborative low-carbon operation strategy of electricity carbon peer-to-peer trading based virtual power plant union and power distribution network[J]. Power System Technology, 2024, 48(9): 3554-3563.

[5] XIE Y, ZHANG Y, LEE W J, et al. Virtual power plants for grid resilience: A concise overview of research and applications [J]. IEEE/CAA Journal of Automatica Sinica, 2024, 11(2): 329-343.

[6] 葛成扬,林顺富,谭津,等. 含多个产消者的虚拟电厂日前协调优化运行策略[J/OL]. 电网技术, 2024: 1-14. [2024-04-15]. <https://link.cnki.net/doi/10.13335/j.1000-3673.pst.2024.0350>.

GE Chengyang, LIN Shunfu, TAN Jin, et al. A day-ahead optimal coordination strategy for a VPP with multiple prosumers[J/OL]. Power System Technology, 2024: 1-14. [2024-04-15]. <https://link.cnki.net/doi/10.13335/j.1000-3673.pst.2024.0350>.

[7] YI Z, XU Y, WU C. Model-free economic dispatch for virtual power plants: An adversarial safe reinforcement learning approach[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2024, 39(2): 3153-3168.

[8] LI B, XU Q. A machine learning-assisted distributed optimization method for inverter-based volt-VAR control in active distribution networks[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2024, 39(2): 2668-2681.

[9] ULLAH N R, BHATTACHARYA K, THIRINGER T. Wind farms as reactive power ancillary service providers: Technical and economic issues [J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2009, 24(3): 661-672.

[10] 黄肖琪,周羽生,周文晴,等. 基于储能和无功优化的直驱机组海上风电场低电压穿越策略[J]. 电测与仪表, 2024, 61(7): 57-64.

HUANG Xiaqi, ZHOU Yusheng, ZHOU Wenqing, et al.

- Low voltage ride through strategy of the D-PMSG offshore wind power farm based on energy storage and reactive power optimization [J]. *Electrical Measurement & Instrumentation*, 2024, 61(7): 57-64.
- [11] 徐贤, 朱丹丹, 徐晓春, 等. 海上风电集群AVC子站无功电压灵敏度协同控制策略研究[J]. *电测与仪表*, 2025, 62(4): 53-64.
- XU Xian, ZHU Dandan, XU Xiaochun, et al. Study on cooperative reactive voltage sensitivity control strategy of AVC substations in clustered offshore wind farm [J]. *Electrical Measurement & Instrumentation*, 2025, 62(4): 53-64.
- [12] 付红军, 孙冉, 赵华, 等. 计及机组有功与无功耦合特性的集群新能源电站无功优化[J]. *现代电力*, 2022, 39(4): 422-432.
- FU Hongjun, SUN Ran, ZHAO Hua, et al. Reactive power optimization of clustered new energy power stations considering active and reactive coupling characteristics of generating units [J]. *Modern Electric Power*, 2022, 39(4): 422-432.
- [13] 王耀翔, 戴朝波, 杨志昌, 等. 考虑风电机组无功潜力的风电场无功电压控制策略[J]. *电力系统保护与控制*, 2022, 50(24): 83-90.
- WANG Yaoxiang, DAI Chaobo, YANG Zhichang, et al. Voltage control strategy for a wind farm considering the reactive capability of DFIGs [J]. *Power System Protection and Control*, 2022, 50(24): 83-90.
- [14] HUANG J, LIU M, ZHANG J, et al. Analysis and field test on reactive capability of photovoltaic power plants based on clusters of inverters [J]. *Journal of Modern Power Systems and Clean Energy*, 2017, 5(2): 283-289.
- [15] SADEK S M, OMRAN W A, MOUSTAFA HASSAN M A, et al. Data driven stochastic energy management for isolated microgrids based on generative adversarial networks considering reactive power capabilities of distributed energy resources and reactive power costs [J]. *IEEE Access*, 2020, 9: 5397-5411.
- [16] 孙胜博, 饶尧, 郭威, 等. 基于改进ADMM的含分布式光伏的配电网电压无功优化方法[J]. *太阳能学报*, 2024, 45(3): 506-516.
- SUN Shengbo, RAO Yao, GUO Wei, et al. Volt/var optimization method of distribution network with distributed photovoltaic based on improved ADMM [J]. *Acta Energiac Solaris Sinica*, 2024, 45(3): 506-516.
- [17] ALI A, ABBAS G, KEERIO M U, et al. A bi-level techno-economic optimal reactive power dispatch considering wind and solar power integration [J]. *IEEE Access*, 2023, 11: 62799-62819.
- [18] 孙浩锋, 章健, 熊壮壮, 等. 含风光储联合发电系统的主动配电网无功优化[J]. *电测与仪表*, 2023, 60(2): 104-110, 125.
- SUN Haofeng, ZHANG Jian, XIONG Zhuangzhuang, et al. Reactive power optimization of active distribution network with wind-photovoltaic-energy storage hybrid generation system [J]. *Electrical Measurement & Instrumentation*, 2023, 60(2): 104-110, 125.
- [19] 王耀翔. 基于风电场无功容量评估的电压控制策略研究 [D]. 北京: 华北电力大学, 2022.
- WANG Yaoxiang. Research on voltage control strategy based on reactive power capacity assessment of wind farm [D]. Beijing: North China Electric Power University, 2022.
- [20] CALDERARO V, CONIO G, GALDI V, et al. Optimal decentralized voltage control for distribution systems with inverter-based distributed generators [J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2014, 29(1): 230-241.
- [21] 吴科成, 高志华, 刘瑞宽, 等. 考虑分布式储能功率四象限输出的主动配电网鲁棒优化调度模型[J]. *南方电网技术*, 2021, 15(11): 75-84.
- WU Kecheng, GAO Zhihua, LIU Ruikuan, et al. Robust optimal scheduling model of active distribution network considering four-quadrant output of distributed energy storage power [J]. *Southern Power System Technology*, 2021, 15(11): 75-84.
- [22] 周良才, 周毅, 沈维健, 等. 基于深度强化学习的新型电力系统无功电压优化控制[J]. *电测与仪表*, 2024, 61(9): 182-189.
- ZHOU Liangcai, ZHOU Yi, SHEN Weijian, et al. Reactive voltage optimization control of novel power system based on deep reinforcement learning [J]. *Electrical Measurement & Instrumentation*, 2024, 61(9): 182-189.
- [23] YANG Z, XIE K, YU J, et al. A general formulation of linear power flow models: Basic theory and error analysis [J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2019, 34(2): 1315-1324.
- [24] KHAN I, LI Z, XU Y, et al. Distributed control algorithm for optimal reactive power control in power grids [J]. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 2016, 83: 505-513.
- [25] 高红均, 刘俊勇, 沈晓东, 等. 主动配电网最优潮流研究及其应用实例[J]. *中国电机工程学报*, 2017, 37(6): 1634-1645.
- GAO Hongjun, LIU Junyong, SHEN Xiaodong, et al. Optimal power flow research in active distribution network and its application examples [J]. *Proceedings of the CSEE*, 2017, 37(6): 1634-1645.
- [26] 闫庆友, 刘达, 李金孟, 等. 基于场景生成与IGDT的风光-碳捕集-P2G虚拟电厂经济调度[J]. *智慧电力*, 2023, 51(2): 1-7.
- YAN Qingyou, LIU Da, LI Jinmeng, et al. Economic dispatching of wind power-PV- carbon capture - P2G virtual power plant based on scenario generating and IGDT [J]. *Smart Power*, 2023, 51(2): 1-7.
- [27] 王宇坤, 陈皓勇, 黄宇翔, 等. 多重不确定性下的虚拟电厂参与电量和需求响应市场鲁棒优化调度策略[J]. *发电技术*, 2024, 45(6): 1173-1185.
- WANG Yushen, CHEN Haoyong, HUANG Yuxiang, et al. Robust optimal scheduling strategy for virtual power plant participation in electric energy and demand response markets under multiple uncertainties [J]. *Power Generation Technology*, 2024, 45(6): 1173-1185.
- [28] 高建伟, 黄宁泊, 高芳杰, 等. 基于改进信息间隙决策理论的考虑决策者风险态度的社区虚拟电厂经济-能源-环境调度策略选择[J]. *电力建设*, 2024, 45(3): 39-57.

- GAO Jianwei, HUANG Ningbo, GAO Fangjie, et al. Selection of economics-energy-environment scheduling strategy for a community virtual power plant considering decision-makers' risk attitudes based on improved information gap decision theory [J]. Electric Power Construction, 2024, 45(3): 39-57.
- [29] 陶泽飞, 刘敏, 何旺. 计及风光不确定性和相关性的虚拟电厂参与电-碳-绿证市场优化调度[J]. 分布式能源, 2024, 9(3): 55-64.
- TAO Zefei, LIU Min, HE Wang. Optimization scheduling of virtual power plants participating in electric energy trade-carbon trade-green license trade considering uncertainty and correlation of wind power and PV [J]. Distributed Energy, 2024, 9(3): 55-64.
- [30] 李东东, 王啸林, 沈运帷, 等. 考虑多重不确定性的含需求响应及电碳交易的虚拟电厂优化调度策略[J]. 电力自动化设备, 2023, 43(5): 210-217, 251.
- LI Dongdong, WANG Xiaolin, SHEN Yunwei, et al. Optimal scheduling strategy of virtual power plant with demand response and electricity-carbon trading considering multiple uncertainties [J]. Electric Power Automation Equipment, 2023, 43(5): 210-217, 251.
- [31] DE M, GOSWAMI S K. Optimal reactive power procurement with voltage stability consideration in deregulated power system [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2014, 29(5): 2078-2086.
- 
- 收稿日期:**2025-02-05
- 作者简介:**
- 
- 陶泽飞
- 陶泽飞(1998),男,硕士研究生,研究方向为虚拟电厂、电力市场、需求响应、系统运行优化;
- 刘敏(1972),女,博士,教授,研究方向为电力投资规划、系统运行优化、智能配电网、电力市场、需求响应等, ee.mliu@gzu.edu.cn;
- 刘文霞(1987),女,博士,高级工程师,主要开展电网规划方法研究及应用、新型电力系统电网规划分析计算相关工作。
- 
- (上接第30页)
- [21] YIN J, DUAN S, LIU B. Stability analysis of grid-connected inverter with LCL filter adopting a digital single-loop controller with inherent damping characteristic [J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2013, 9(2): 1104-1112.
- [22] DANNEHL J, FUCHS F W, HANSEN S, et al. Investigation of active damping approaches for PI-based current control of grid-connected pulse width modulation converters with LCL filters [J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2010, 46(4): 1509-1517.
- [23] YU T, CHOI S, KIM H. Indirect current control algorithm for utility interactive inverters for seamless transfer [C]// Power Electronics Specialists Conference. Jeju: IEEE, 2006: 1-6.
- [24] MALINOWSKI M, BERNET S. A simple voltage sensorless active damping scheme for three-phase PWM converters with an LCL Filter [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2008, 55(4): 1876-1880.
- [25] 张兴, 张崇巍. PWM整流器及其控制[M]. 1版. 北京: 机械工业出版社, 2012.
- 
- 收稿日期:**2024-11-08
- 作者简介:**
- 
- 钱为
- 钱为(1992),男,硕士,工程师,研究方向为储能变流器、城市轨道交通牵引供电等大功率电力电子技术, qianwei@nrec.com;
- 刘洪德(1986),男,硕士,高级工程师,研究方向为柔性直流输电及大功率电力电子应用技术;
- 吴扣林(1984),男,硕士,高级工程师,研究方向为城市轨道交通牵引供电、静止无功发生器等大功率电力电子技术;
- 袁庆伟(1988),男,博士,高级工程师,从事AC/DC变流器的研究;
- 谢晔源(1988),男,硕士,教授级高级工程师,从事柔性直流输电和无功补偿技术的研究。