

# 考虑柔性负荷无功调节能力的配网日前 两阶段无功随机优化调度

黄昊<sup>1</sup>, 倪秋龙<sup>2</sup>, 李震<sup>3</sup>, 鞠平<sup>1</sup>, 吴浩<sup>1</sup>

(1. 浙江大学电气工程学院, 浙江 杭州 310027; 2. 国网浙江省电力有限公司, 浙江 杭州 310007;  
3. 国网浙江省电力有限公司衢州供电公司, 浙江 衢州 324000)

**摘要:** 针对高比例分布式光伏接入配网所引起的电压控制问题, 利用柔性负荷的无功调节能力, 并考虑光伏和负荷的不确定性, 提出了配网日前两阶段无功随机优化调度方法。首先, 在第1阶段根据光伏和负荷的预测值, 优化反映电容器组动作和柔性负荷无功调度的离散决策变量。其次, 在第2阶段考虑光伏和负荷的不确定性, 优化光伏的无功出力 and 柔性负荷的无功调度量。在优化模型中, 设置了电压偏差最小化和柔性负荷的无功调度次数最小化两种目标函数, 采用 $\varepsilon$ 约束法对多目标优化问题进行求解, 并利用熵权优劣解距离(technique for order preference by similarity to ideal solution, TOPSIS)法选择最优折衷解。在修改的IEEE33节点系统进行仿真, 结果表明所提方法能有效缓解由高比例分布式光伏并网所引起的电压越限问题。

**关键词:** 柔性负荷; 两阶段随机优化; 无功优化; 熵权 TOPSIS 法

## Day-ahead two-stage stochastic reactive power scheduling optimization for a distribution network considering the reactive power regulation capability of flexible loads

HUANG Hao<sup>1</sup>, NI Qiulong<sup>2</sup>, LI Zhen<sup>3</sup>, JU Ping<sup>1</sup>, WU Hao<sup>1</sup>

(1. College of Electrical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China; 2. State Grid Zhejiang Electric Power Co., Ltd., Hangzhou 310007, China; 3. Quzhou Power Supply Company, State Grid Zhejiang Electric Power Co., Ltd., Quzhou 324000, China)

**Abstract:** To solve the voltage control problem caused by the high penetration of photovoltaics (PVs) in distribution networks, a day-ahead two-stage stochastic reactive power scheduling optimization method is proposed. This uses the reactive power regulation capability of flexible loads (FLs) and considers PVs and load uncertainties. In the first stage, the discrete decision variables reflecting operation of capacitor banks and scheduling of FL reactive power are optimized based on the predicted PV generation and load power. In the second stage, the continuous decision variables reflecting PV reactive output and FL scheduled reactive power are optimized considering the uncertainties from PVs and loads. Two objective functions are set in the proposed model. They minimize the voltage deviation and the amount of FL reactive power scheduling simultaneously. The  $\varepsilon$ -constraint method is adopted to tackle the multi-objective optimization model, and the entropy weight TOPSIS method is used to select the optimal compromise solution. Case studies of the modified IEEE 33-bus system show that the proposed method can effectively alleviate the voltage over-limit problem caused by PV integration.

This work is supported by the National Natural Science Foundation of China (No. U2066601).

**Key words:** flexible load; two-stage stochastic optimization; reactive power optimization; entropy weight TOPSIS method

## 0 引言

在“双碳”战略目标的持续推进下, 新能源发

电装机容量持续增长, 以新能源为主体的新型电力系统正处于快速发展中。随着光伏(photovoltaic, PV)在配网中所占比例的增加, PV固有的间歇性和波动性使配网的运行具有显著的不确定性<sup>[1]</sup>。同时, 在PV出力较大而负荷较小的高渗透率场景下, 线

路功率倒送会对 PV 接入点及其附近节点电压有抬高的作用, 严重时甚至出现电压越上限的情况<sup>[2]</sup>。因此, 对以柔性负荷(flexible load, FL)为代表的分散资源进行优化调度, 有利于应对配网电压控制所面临着巨大的挑战<sup>[1-2]</sup>。

高比例分布式 PV 接入引起的配网电压控制问题, 可以通过有功调节和无功调节两种手段解决<sup>[3]</sup>。在电压控制的早期研究中, 仅考虑协调各类无功设备调节的无功优化得到了广泛的应用<sup>[4-7]</sup>, 相关的无功设备包括: 有载调压变压器、电容器组(capacitor bank, CB)、静止无功发生器(static VAR generator, SVG)和 PV 逆变器等。近年来, 有研究表明电动汽车、储能和 FL 的有功调节<sup>[3,8-10]</sup>同样可以进行电压调节, 将有功调节和无功调节两种手段综合考虑的有功-无功协调优化可以实现有效的电压控制<sup>[3,10]</sup>。然而, 在现有的电压控制研究中, 很少有挖掘 FL 无功调节能力的相关研究。

FL 是指能够根据需求改变用电行为, 主动响应电网运行控制的负荷<sup>[11]</sup>。现阶段, 关于 FL 的大部分研究均集中在需求响应实施背景下的有功经济调度, 通过价格信号、激励机制和调度指令等措施<sup>[11-13]</sup>, 使其能够积极参与电网调控, 有效改善电网的负荷功率曲线, 实现削峰填谷和减少运行成本<sup>[14-15]</sup>。除了有功调节能力外, 以大型工商业负荷为代表的 FL 由于拥有 CB、SVG 等无功调节设备, 也具备一定的无功调节能力。尽管电网无法直接调度 FL 所拥有的分散无功调节资源, 但 FL 与电网企业、市场运营机构签订无功辅助服务(并网调度协议)和结算协议后, 可作为第三方独立主体提供无功辅助服务, 进而参与电网的无功优化。

在电力系统的优化研究中, 诸多问题涉及多目标优化, 该类问题中各目标往往相互冲突, 因此最优解通常不是单一的, 而是一个由多个最优解组成的 Pareto 集合<sup>[16]</sup>。传统的线性加权法将各目标赋权相加转为单目标优化问题, 仅能得到单一的最优解。 $\epsilon$ 约束法将除主目标函数以外的目标函数转为以不同的参数  $\epsilon$  为边界的不等式约束, 通过改变  $\epsilon$  的值可以得到相应的 Pareto 解集<sup>[17-18]</sup>。此外, 与线性加权法相比,  $\epsilon$ 约束法无须主观性较强的赋权操作且在含离散变量的优化问题中更具优势<sup>[17]</sup>。

本文针对高比例分布式 PV 接入配网所引起的电压控制问题, 考虑 FL 的无功调节能力, 构建了可以向电网提供无功辅助服务的 FL 的无功调度数学模型, 提出了配网日前两阶段无功随机优化调度方法。在构建的两阶段无功随机优化调度模型中,

采用  $\epsilon$ 约束法对多目标优化问题进行求解, 并利用熵权优劣解距离(technique for order preference by similarity to ideal solution, TOPSIS)法选择最优折衷解。算例结果验证了本文所提方法的有效性。

### 1 FL 的无功调节能力

按无功调节能力, FL 可分为两大类——无功非独立可调负荷和无功独立可调负荷, 如图 1 所示。

#### 1) 无功非独立可调负荷

该类负荷没有额外的无功可调设备(如照明负荷、空调负荷等), 主要以小型、分散的居民负荷为代表。其只能通过调节有功进而实现无功调节, 成本过高, 因此在无功优化中不宜考虑该类负荷。

#### 2) 无功独立可调负荷

该类负荷具有额外的无功可调设备(如 CB、SVG 和 PV 等)或自身具备无功调节能力(如分布式储能设备、电动汽车充电桩等), 主要以大型工商业负荷为代表。由于无功调节对其商业运营和工业生产所需的有功功率影响较小, 调节成本较低, 因此在无功优化中可以考虑该类负荷。

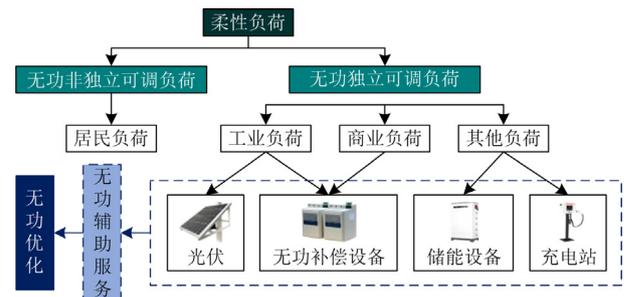


图 1 FL 分类框图

Fig. 1 Block diagram for classification of FLs

无功独立可调负荷可以通过向电网提供无功辅助服务, 参与无功优化。需要说明的是: (1) 本文重点研究 FL 参与无功优化调度对电压越限的改善作用, 而 FL 的无功辅助服务定价问题是一个复杂的问题, 不易纳入本文的研究范围; (2) 在满足电压质量的条件下减少 FL 的调度次数是一种有效的节约成本的手段。因此, 构建的模型通过设立无功调度次数最小化这一目标, 间接地考虑了无功调度的成本。

### 2 配网日前两阶段无功随机优化架构

不确定环境下电力系统优化调度的主要研究方法包括随机优化、鲁棒优化和分布式鲁棒优化; 进一步, 针对电力系统日前的优化调度, 上述方法可进化为两阶段随机/鲁棒/分布式鲁棒优化方法<sup>[19]</sup>。其中, 随机优化针对随机变量的概率分布已知的问题

题进行优化；鲁棒优化考虑随机变量在不确定集中形成的最差场景进行优化；分布式鲁棒优化基于统计信息建立随机变量概率分布，寻找最劣概率分布下的优化结果。研究表明，PV 和负荷的预测误差服从从正态分布<sup>[20-22]</sup>，因此本文基于两阶段随机优化方法构建了日前无功优化调度的模型。

对于两阶段随机优化调度模型，在第 1 阶段，考虑新能源发电和负荷的预测值，优化离散决策变量，如反映机组组合的变量<sup>[23-24]</sup>、反映离散无功设备动作的变量<sup>[25-26]</sup>和反映光热电站出力计划的变量<sup>[27]</sup>等，此类变量称为 Here-And-Now(HN)变量<sup>[28-29]</sup>；在第 2 阶段，考虑新能源发电和负荷的预测误差，根据生成的随机场景优化连续决策变量，如机组出力<sup>[23-24]</sup>、新能源无功出力<sup>[25-26]</sup>和光热电站出力<sup>[27]</sup>等，此类变量称为 Wait-And-See(WS)变量<sup>[28-29]</sup>。

据此，本文所提的配网日前两阶段无功随机优化架构如图 2 所示。第 1 阶段根据 PV 和负荷的预测值(初始场景)优化 HN 变量，即反映 CB 动作计划的变量  $n_{i,C}^{t,0}$  和反映 FL 无功调度计划的变量  $n_{i,FL}^{t,0}$ ；第 2 阶段考虑 PV 和负荷的预测误差，根据生成的  $N_s$  个随机场景优化 WS 变量，即反映 PV 无功调节的变量  $Q_{i,PV}^{t,s}$  和反映 FL 无功调节的变量  $\Delta Q_{i,FL}^{t,s}$ 。

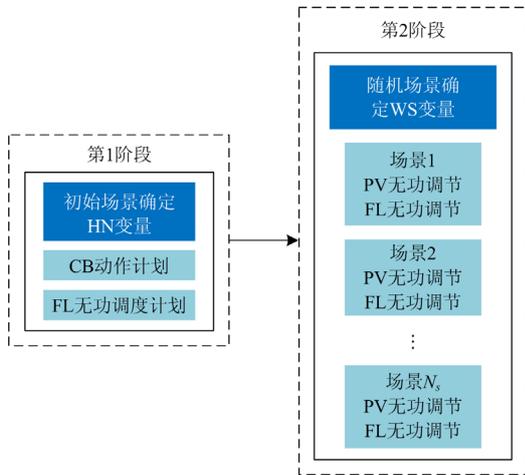


图 2 配网日前两阶段无功随机优化架构

Fig. 2 Framework of day-ahead two-stage reactive power stochastic scheduling optimization for distribution network

### 3 配网日前两阶段无功随机优化调度模型

无功优化的数学本质是一个复杂的非凸混合整数非线性规划问题，而二阶锥规划因其具有大范围收敛性，能够求得全局最优解等优点，已被广泛应用于最优潮流、无功优化等领域<sup>[30]</sup>。

本节基于二阶锥规划构建了两阶段无功随机优

化调度模型，其中，上标  $t$ 、 $s$  表示第  $s$  个场景中在  $t$  时刻的变量，特别地，第 0 个场景为初始场景。

#### 3.1 第 1 阶段模型

##### 3.1.1 第 1 阶段目标函数

第 1 阶段目标函数包含电压偏差最小化和 FL 无功调度次数最小化两大部分。

##### 1) 电压偏差最小化

$$\min \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^n \left| \tilde{v}_i^{t,0} - (V_i^{\text{ref}})^2 \right| \quad (1)$$

式中： $T$  为调度总时段； $n$  为系统节点个数；

$\tilde{v}_i^{t,0} = (V_i^{t,0})^2$ ，其中  $V_i^{t,0}$  为第  $i$  个节点的电压幅值；

$V_i^{\text{ref}}$  为第  $i$  个节点的电压基准值。

##### 2) FL 无功调度次数最小化

$$\min \sum_{t=1}^T n_{i,FL}^{t,0} \quad i=1,2,3,\dots,n_{FL} \quad (2)$$

式中： $n_{i,FL}^{t,0}$  为 0-1 变量，其值为 1 对第  $i$  个 FL 进行无功调度，为 0 则不调度； $n_{FL}$  为 FL 的个数。

##### 3.1.2 第 1 阶段约束条件

##### 1) 配网二阶锥潮流约束

配网的 DistFlow<sup>[30]</sup>支路潮流方程为

$$(P_{ij}^{t,0})^2 + (Q_{ij}^{t,0})^2 = (I_{ij}^{t,0})^2 \cdot (V_i^{t,0})^2 \quad \forall ij \in B \quad (3)$$

$$(V_j^{t,0})^2 = (V_i^{t,0})^2 - 2(P_{ij}^{t,0} \cdot r_{ij} + Q_{ij}^{t,0} \cdot x_{ij}) + \quad (4)$$

$$(I_{ij}^{t,0})^2 \cdot (r_{ij}^2 + x_{ij}^2) \quad \forall ij \in B$$

$$\begin{cases} P_j^{t,0} = \sum_{k \in \alpha(j)} P_{jk}^{t,0} - \sum_{i \in \beta(j)} (P_{ij}^{t,0} - (I_{ij}^{t,0})^2 \cdot r_{ij}) \quad \forall j \in \Omega \\ Q_j^{t,0} = \sum_{k \in \alpha(j)} Q_{jk}^{t,0} - \sum_{i \in \beta(j)} (Q_{ij}^{t,0} - (I_{ij}^{t,0})^2 \cdot x_{ij}) \quad \forall j \in \Omega \end{cases} \quad (5)$$

式中： $B$  表示系统所有支路的集合； $\Omega$  表示系统所有节点的集合； $\alpha(j)$ 、 $\beta(j)$  分别表示以节点  $j$  为首端的支路的末端节点集合和以节点  $j$  为末端的支路的首端节点集合； $P_{ij}^{t,0}$ 、 $Q_{ij}^{t,0}$  分别表示流过支路  $ij$  的有功、无功功率； $P_{jk}^{t,0}$ 、 $Q_{jk}^{t,0}$  分别表示流过支路  $jk$  的有功、无功功率； $I_{ij}^{t,0}$  表示支路  $ij$  的电流； $V_j^{t,0}$  表示节点  $j$  的电压幅值； $r_{ij}$ 、 $x_{ij}$  分别表示支路  $ij$  的电阻、电抗； $P_j^{t,0}$ 、 $Q_j^{t,0}$  分别表示节点  $j$  处注入的有功、无功功率。

令  $\tilde{l}_{ij}^{t,0} = (I_{ij}^{t,0})^2$ 、 $\tilde{v}_i^{t,0} = (V_i^{t,0})^2$ ，对式(3)一式(5)

进行变量替换，并对式(5)进行二阶锥松弛转化，可得配网二阶锥潮流约束为

$$\left\| \begin{bmatrix} 2P_{ij}^{t,0} & 2Q_{ij}^{t,0} & \tilde{l}_{ij}^{t,0} & -\tilde{v}_i^{t,0} \end{bmatrix} \right\|_2 \leq \tilde{l}_{ij}^{t,0} + \tilde{v}_i^{t,0} \quad \forall ij \in B \quad (6)$$

$$\begin{aligned} \tilde{v}_j^{t,0} &= \tilde{v}_i^{t,0} - 2(P_{ij}^{t,0} \cdot r_{ij} + Q_{ij}^{t,0} \cdot x_{ij}) + \\ &\tilde{l}_{ij}^{t,0} \cdot (r_{ij}^2 + x_{ij}^2) \quad \forall ij \in B \end{aligned} \quad (7)$$

$$\begin{cases} P_j^{t,0} = \sum_{k \in \alpha(j)} P_{jk}^{t,0} - \sum_{i \in \beta(j)} (P_{ij}^{t,0} - \tilde{l}_{ij}^{t,0} \cdot r_{ij}) \quad \forall j \in \Omega \\ Q_j^{t,0} = \sum_{k \in \alpha(j)} Q_{jk}^{t,0} - \sum_{i \in \beta(j)} (Q_{ij}^{t,0} - \tilde{l}_{ij}^{t,0} \cdot x_{ij}) \quad \forall j \in \Omega \end{cases} \quad (8)$$

## 2) 系统安全约束

$$V_{i,\min}^2 \leq \tilde{v}_i^{t,0} \leq V_{i,\max}^2 \quad (9)$$

$$0 \leq \tilde{l}_{ij}^{t,0} \leq I_{ij,\max}^2 \quad (10)$$

式中:  $V_{i,\max}$ 、 $V_{i,\min}$  分别为节点  $i$  的电压幅值上下限;  $I_{ij,\max}$  为支路  $ij$  的电流幅值上限。

在比较恶劣的场景下, 部分节点电压无法严格满足式(9)所述约束, 进而导致模型无解。因此, 为保证模型的解始终存在, 对式(9)进行松弛处理, 即

$$\begin{cases} \alpha_i^{t,0} + \beta_i^{t,0} \leq 1 \\ \alpha_i^{t,0} \cdot (\overline{V_{i,\lim}^2} - V_{i,\min}^2) \leq \tilde{v}_i^{t,0} - V_{i,\min}^2 \leq \\ \quad (1 - \alpha_i^{t,0}) \cdot (\overline{V_{i,\lim}^2} - V_{i,\min}^2) \\ (1 - \beta_i^{t,0}) \cdot (V_{i,\lim}^2 - \underline{V_{i,\max}^2}) \leq \tilde{v}_i^{t,0} - V_{i,\max}^2 \leq \\ \quad \beta_i^{t,0} \cdot (\overline{V_{i,\lim}^2} - V_{i,\max}^2) \end{cases} \quad (11)$$

式中:  $\alpha_i^{t,0}$ 、 $\beta_i^{t,0}$  分别为反映节点电压是否越下限和上限的 0-1 变量, 即节点电压越下(上)限时  $\alpha_i^{t,0}$  ( $\beta_i^{t,0}$ ) 值为 1, 反之则为 0;  $\overline{V_{i,\lim}^2}$ 、 $\underline{V_{i,\lim}^2}$  分别为节点  $i$  发生电压越限时不能超过的电压幅值上下限。由于  $\alpha_i^{t,0} + \beta_i^{t,0} \leq 1$ , 电压约束仅存在以下 3 种情形: (1) 电压未越限, 即  $\alpha_i^{t,0} = \beta_i^{t,0} = 0$ , 电压约束范围为  $[V_{i,\min}^2, V_{i,\max}^2]$ ; (2) 电压越下限, 即  $\alpha_i^{t,0} = 1$ 、 $\beta_i^{t,0} = 0$ , 电压约束范围为  $[V_{i,\lim}^2, V_{i,\min}^2]$ ; (3) 电压越上限, 即  $\alpha_i^{t,0} = 0$ 、 $\beta_i^{t,0} = 1$ , 电压约束范围为  $[V_{i,\max}^2, \overline{V_{i,\lim}^2}]$ 。

## 3) 分布式 PV 约束

分布式 PV 约束包含逆变器容量约束和逆变器功率因数约束<sup>[1]</sup>。

$$\begin{cases} -\sqrt{S_{i,\text{PV}}^2 - (P_{i,\text{PV}}^{t,0})^2} \leq Q_{i,\text{PV}}^{t,0} \leq \sqrt{S_{i,\text{PV}}^2 - (P_{i,\text{PV}}^{t,0})^2} \\ -\tan \varphi_{i,\text{PV}} \cdot P_{i,\text{PV}}^{t,0} \leq Q_{i,\text{PV}}^{t,0} \leq \tan \varphi_{i,\text{PV}} \cdot P_{i,\text{PV}}^{t,0} \end{cases} \quad (12)$$

式中:  $P_{i,\text{PV}}^{t,0}$ 、 $Q_{i,\text{PV}}^{t,0}$  分别为节点  $i$  处 PV 的有功、无功功率;  $S_{i,\text{PV}}$  为节点  $i$  处 PV 的容量;  $\varphi_{i,\text{PV}}$  为节点  $i$  处 PV 并网逆变器运行所允许的最大功率因数角。

## 4) CB 约束

第 1 阶段 CB 需要满足投运组数的约束以及一

天内投切次数的约束, 其中包含 HN 变量  $n_{i,\text{C}}^{t,0}$ , 即有

$$\begin{cases} n_{i,\text{C}}^{t,0} \leq n_{i,\text{C}}^{\max} \\ \sum_{t=1}^T n_{i,\text{C}}^{t,0} \oplus n_{i,\text{C}}^{t,0} \leq N_{i,\text{C}}^{\max} \end{cases} \quad (13)$$

式中:  $n_{i,\text{C}}^{t,0}$  为节点  $i$  处 CB 的投运组数;  $n_{i,\text{C}}^{\max}$  为节点  $i$  处 CB 的投运组数上限;  $\oplus$  为异或运算符, 即  $n_{i,\text{C}}^{t-1,0}$  和  $n_{i,\text{C}}^{t,0}$  相同时结果为 0, 不同则为 1;  $N_{i,\text{C}}^{\max}$  为节点  $i$  处 CB 的最大动作次数。

## 5) FL 约束

第 1 阶段 FL 需满足无功调度量的约束, 其中包含 HN 变量  $n_{i,\text{FL}}^{t,0}$ , 即有

$$0 \leq \Delta Q_{i,\text{FL}}^{t,0} \leq n_{i,\text{FL}}^{t,0} \cdot (\tan \varphi_{i,\text{FL}} \cdot P_{i,\text{FL}}^{t,0} - Q_{i,\text{FL}}^{t,0}) \quad (14)$$

式中:  $\Delta Q_{i,\text{FL}}^{t,0}$  为节点  $i$  处 FL 的无功调度量;  $P_{i,\text{FL}}^{t,0}$ 、 $Q_{i,\text{FL}}^{t,0}$  分别为节点  $i$  处 FL 的有功、无功功率;  $\varphi_{i,\text{FL}}$  为节点  $i$  处 FL 运行所允许的最大功率因数角。

## 3.1.3 $\varepsilon$ 约束法

针对第 1 阶段的多目标优化问题, 本文采用  $\varepsilon$  约束法进行求解。假设某多目标优化问题有  $m$  个目标函数, 记为  $f_\delta(x)$  ( $\delta=1,2,\dots,m$ )。该方法将原多目标优化问题转化为单目标优化问题, 在  $m$  个目标函数中保留一个主目标函数  $f_{\delta_0}(x)$  ( $\delta_0 \in \{1,2,\dots,m\}$ ), 并设置适当的参数  $\varepsilon_i$  值, 将其余目标函数转化为不等式约束<sup>[17]</sup>。 $\varepsilon$  约束法的形式化定义为

$$\begin{cases} \min f_{\delta_0}(x), \quad \delta_0 \in \{1,2,\dots,m\} \\ \text{s.t. } f_\delta(x) \leq \varepsilon_\delta, \quad \delta=1,2,\dots,m \text{ and } \delta \neq \delta_0 \end{cases} \quad (15)$$

本文通过  $\varepsilon$  约束法将 FL 无功调度次数最小化这一目标函数, 即式(2), 处理为不等式约束, 并将其增加至式(14)所述 FL 约束中, 则原 FL 约束转换为

$$\begin{cases} 0 \leq \Delta Q_{i,\text{FL}}^{t,0} \leq n_{i,\text{FL}}^{t,0} \cdot (\tan \varphi_{i,\text{FL}} \cdot P_{i,\text{FL}}^{t,0} - Q_{i,\text{FL}}^{t,0}) \\ \sum_{t=1}^T n_{i,\text{FL}}^{t,0} \leq \varepsilon \end{cases} \quad (16)$$

式中,  $\varepsilon$  为 FL 无功功率一天内被调度的最大次数。

此时, 经  $\varepsilon$  约束法处理后, 第 1 阶段的多目标优化问题转为了单目标优化问题, 可表示为

$$\begin{cases} \min f_1 = \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^n |\tilde{v}_i^{t,0} - (V_i^{\text{ref}})^2| \\ \text{s.t. 式(6)一式(8), 式(10)一式(13), 式(16)} \end{cases} \quad (17)$$

## 3.1.4 绝对值线性化

式(17)所述模型的目标函数带有绝对值, 难以直接求解。故引入辅助变量  $\Delta U_i^{t,0}$  将其线性化, 可表示为

$$\min \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^n \Delta U_i^{t,0} \quad (18)$$

线性约束为

$$-\Delta U_i^{t,0} \leq \tilde{v}_i^{t,0} - (V_i^{\text{ref}})^2 \leq \Delta U_i^{t,0} \quad (19)$$

综上所述, 经二阶锥松弛、 $\varepsilon$ 约束法和绝对值线性化处理, 第1阶段形成的二阶锥模型为

$$\begin{cases} \min f_1 = \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^n \Delta U_i^{t,0} \\ \text{s.t. 式(6)一式(8), 式(10)一式(13), 式(16), 式(19)} \end{cases} \quad (20)$$

### 3.2 第2阶段模型

#### 3.2.1 第2阶段目标函数

由于反映 FL 无功调度计划的 HN 变量  $n_{i,\text{FL}}^{t,0}$  在第一阶段已确定, 故第2阶段目标函数仅包含电压偏差最小化, 即

$$\min \frac{1}{N_s} \cdot \sum_{s=1}^{N_s} \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^n \left| \tilde{v}_i^{t,s} - (V_i^{\text{ref}})^2 \right| \quad (21)$$

式中,  $N_s$  为生成场景的个数。

#### 3.2.2 第2阶段约束条件

第2阶段中的潮流约束、安全约束和 PV 约束与第1阶段所述相比仅改变了上标。CB 和 FL 相关约束由于含 HN 变量, 形式上有所变化。

##### 1) 配网二阶锥潮流约束

$$\left\| [2P_{ij}^{t,s} \quad 2Q_{ij}^{t,s} \quad \tilde{l}_{ij}^{t,s} - \tilde{v}_i^{t,s}]^T \right\|_2 \leq \tilde{l}_{ij}^{t,s} + \tilde{v}_i^{t,s} \quad \forall ij \in B \quad (22)$$

$$\tilde{v}_j^{t,s} = \tilde{v}_i^{t,s} - 2(P_{ij}^{t,s} \cdot r_{ij} + Q_{ij}^{t,s} \cdot x_{ij}) + \tilde{l}_{ij}^{t,s} \cdot (r_{ij}^2 + x_{ij}^2) \quad \forall ij \in B \quad (23)$$

$$\begin{cases} P_j^{t,s} = \sum_{k \in \alpha(j)} P_{jk}^{t,s} - \sum_{i \in \beta(j)} (P_{ij}^{t,s} - \tilde{l}_{ij}^{t,s} \cdot r_{ij}) \quad \forall j \in \Omega \\ Q_j^{t,s} = \sum_{k \in \alpha(j)} Q_{jk}^{t,s} - \sum_{i \in \beta(j)} (Q_{ij}^{t,s} - \tilde{l}_{ij}^{t,s} \cdot x_{ij}) \quad \forall j \in \Omega \end{cases} \quad (24)$$

##### 2) 系统安全约束

$$\begin{cases} \alpha_i^{t,s} + \beta_i^{t,s} \leq 1 \\ \alpha_i^{t,s} \cdot (\overline{V_{i,\text{lim}}^2} - V_{i,\text{min}}^2) \leq \tilde{v}_i^{t,s} - V_{i,\text{min}}^2 \leq (1 - \alpha_i^{t,s}) \cdot (\overline{V_{i,\text{lim}}^2} - V_{i,\text{min}}^2) \\ (1 - \beta_i^{t,s}) \cdot (\overline{V_{i,\text{lim}}^2} - V_{i,\text{max}}^2) \leq \tilde{v}_i^{t,s} - V_{i,\text{max}}^2 \leq \beta_i^{t,s} \cdot (\overline{V_{i,\text{lim}}^2} - V_{i,\text{max}}^2) \end{cases} \quad (25)$$

$$0 \leq \tilde{l}_{ij}^{t,s} \leq I_{ij,\text{max}}^2 \quad (26)$$

##### 3) 分布式 PV 约束

$$\begin{cases} -\sqrt{S_{i,\text{PV}}^2 - (P_{i,\text{PV}}^{t,s})^2} \leq Q_{i,\text{PV}}^{t,s} \leq \sqrt{S_{i,\text{PV}}^2 - (P_{i,\text{PV}}^{t,s})^2} \\ -\tan \varphi_{i,\text{PV}} \cdot P_{i,\text{PV}}^{t,s} \leq Q_{i,\text{PV}}^{t,s} \leq \tan \varphi_{i,\text{PV}} \cdot P_{i,\text{PV}}^{t,s} \end{cases} \quad (27)$$

##### 4) CB 约束

第2阶段 CB 动作计划已由 HN 变量  $n_{i,\text{C}}^{t,0}$  确定, 故有

$$n_{i,\text{C}}^{t,s} = n_{i,\text{C}}^{t,0} \quad (28)$$

##### 5) FL 约束

第2阶段 FL 调度计划已由 HN 变量  $n_{i,\text{FL}}^{t,0}$  确定, 故有

$$0 \leq \Delta Q_{i,\text{FL}}^{t,s} \leq n_{i,\text{FL}}^{t,0} \cdot (\tan \varphi_{i,\text{FL}} \cdot P_{i,\text{FL}}^{t,s} - Q_{i,\text{FL}}^{t,s}) \quad (29)$$

#### 3.2.3 绝对值线性化

同第1阶段一样, 须引入辅助变量  $\Delta U_i^{t,s}$  将含绝对值的目标函数线性化, 表示为

$$\min \frac{1}{N_s} \cdot \sum_{s=1}^{N_s} \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^n \Delta U_i^{t,s} \quad (30)$$

线性约束为

$$-\Delta U_i^{t,s} \leq \tilde{v}_i^{t,s} - (V_i^{\text{ref}})^2 \leq \Delta U_i^{t,s} \quad (31)$$

综上所述, 第2阶段的二阶锥模型可表示为

$$\begin{cases} \min f_2 = \frac{1}{N_s} \cdot \sum_{s=1}^{N_s} \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^n \Delta U_i^{t,s} \\ \text{s.t. 式(22)一式(29), 式(31)} \end{cases} \quad (32)$$

## 4 求解方法

第3节基于二阶锥规划构建了两阶段无功随机优化调度模型, 可以直接调用 CPLEX 或 GORUBI 等商业优化软件进行求解。

需要说明的是, 由于3.1节利用  $\varepsilon$  约束法将第1阶段的 FL 无功调度次数最小化的目标函数处理为不等式约束, 即式(16), 通过改变  $\varepsilon$  的值可以得到不同的优化结果, 从而形成 Pareto 解集。决策者需要从 Pareto 解集中选取最优折衷解以形成最终决策方案, 传统的加权法或模糊决策法均能完成选取, 但权重的制定和隶属函数的选取都偏主观<sup>[18,29]</sup>。因此, 本文采用客观性较强的熵权 TOPSIS 法<sup>[31-32]</sup>选取 Pareto 解集中的最优折衷解。

### 4.1 熵权 TOPSIS 法

熵权法是一种客观的赋权方法, 根据数据的变化程度分配权重, 而 TOPSIS 法是一种运用距离作为评价标准的综合评价方法<sup>[32]</sup>, 将二者相结合, 可使结果客观性更强, 其求解步骤如下。

步骤1: 根据 Pareto 解集构建初始评价矩阵  $\mathbf{H}$ , 对  $\mathbf{H}$  进行正向化处理生成矩阵  $\mathbf{Y}$ , 并根据向量规范化法生成标准化矩阵  $\mathbf{Z}$ 。

$$\mathbf{H} = (h_{ab})_{p \times q} = \begin{bmatrix} h_{11} & \cdots & h_{1q} \\ \vdots & & \vdots \\ h_{p1} & \cdots & h_{pq} \end{bmatrix} \quad (33)$$

$$Y = (y_{ab})_{p \times q} = (\max\{h_{1b}, h_{2b}, \dots, h_{pb}\} - h_{ab})_{p \times q} \quad (34)$$

$$Z = (z_{ab})_{p \times q} = (y_{ab} / \sqrt{\sum_{a=1}^p y_{ab}^2})_{p \times q} \quad (35)$$

式中:  $p$  为 Pareto 解集中解的个数;  $q$  为目标函数的个数;  $h_{ab}$  为第  $a$  组解中第  $b$  个目标函数的值。

步骤 2: 采用熵权法确定各目标的熵权。

1) 生成比重矩阵  $P$

$$P = (p_{ab})_{p \times q} = (z_{ab} / \sum_{a=1}^p z_{ab})_{p \times q} \quad (36)$$

式中,  $p_{ab}$  为第  $a$  组解中第  $b$  个目标函数的比重。

2) 计算各目标函数的信息熵

$$e_b = -\ln(p)^{-1} \cdot \sum_{a=1}^p (p_{ab} \cdot \ln p_{ab}) \quad b=1, 2, \dots, q \quad (37)$$

式中,  $e_b$  为第  $b$  个目标函数的信息熵。

3) 计算各目标函数的熵权

$$w_b = (1 - e_b) / \sum_{b=1}^q (1 - e_b) \quad b=1, 2, \dots, q \quad (38)$$

式中,  $w_b$  为第  $b$  个目标函数的熵权。

步骤 3: 采用 TOPSIS 法选取最优折衷解。

1) 生成评价矩阵  $G$

$$G = (g_{ab})_{p \times q} = (w_b \cdot z_{ab})_{p \times q} \quad (39)$$

式中,  $g_{ab}$  为第  $a$  组解中第  $b$  个目标函数经熵权法处理后的值。

2) 计算正理想解向量  $G^+ = (g_1^+, g_2^+, \dots, g_q^+)$  和负理想解向量  $G^- = (g_1^-, g_2^-, \dots, g_q^-)$ , 各元素可表示为

$$\begin{cases} g_b^+ = \max\{g_{1b}, g_{2b}, \dots, g_{pb}\} & b=1, 2, 3, \dots, q \\ g_b^- = \min\{g_{1b}, g_{2b}, \dots, g_{pb}\} & b=1, 2, 3, \dots, q \end{cases} \quad (40)$$

3) 计算各组解到正、负理想解的欧氏距离

$$\begin{cases} D_a^+ = \sqrt{\sum_{b=1}^q (g_{ab} - g_b^+)^2} \\ D_a^- = \sqrt{\sum_{b=1}^q (g_{ab} - g_b^-)^2} \end{cases} \quad (41)$$

式中,  $D_a^+$ 、 $D_a^-$  分别为第  $a$  组解到正、负理想解的欧氏距离。

4) 计算各组解对理想解的贴近度

$$C_a = \frac{D_a^-}{D_a^+ + D_a^-} \quad (42)$$

式中,  $C_a$  为第  $a$  组解对理想解的贴近度。

贴近度反映了方案的优劣, 其值越大, 表明方案与正理想解越接近, 效果越好; 反之, 则效果越差<sup>[32]</sup>。贴近度最大的方案即为 Pareto 解集中的最优

折衷解。

## 4.2 求解流程

本文所提两阶段无功随机优化调度方法求解步骤如图 3 所示, 具体步骤如下。

步骤 1: 第 1 阶段无功优化。

1) 设定  $\varepsilon$  取值集合  $E$ , 其中  $E\{\gamma\}$  表示集合中的第  $\gamma$  个元素, 从  $\gamma=1$  开始取值;

2) 求解如式(20)所述的优化模型;

3) 将优化结果加入 Pareto 解集, 并判断  $\varepsilon$  是否已遍历集合  $E$ : 若  $\gamma \leq \gamma_{\max}$ , 则令  $\gamma = \gamma + 1$ , 并返回步骤 2); 反之, 则基于熵权 TOPSIS 法从 Pareto 解集中选取最优折衷解作为最优方案, 确定 HN 变量  $n_{i,C}^{t,0}$ 、 $n_{i,FL}^{t,0}$ 。

步骤 2: 第 2 阶段无功优化。

1) 根据第 2 节所述, 相关研究表明, PV 和负荷的预测误差服从高斯分布, 利用蒙特卡洛法进行采样, 并生成  $N_s$  个随机场景;

2) 求解如式(32)所述的优化模型, 确定 WS 变量  $Q_{i,PV}^{t,s}$ 、 $\Delta Q_{i,FL}^{t,s}$ , 并输出结果。

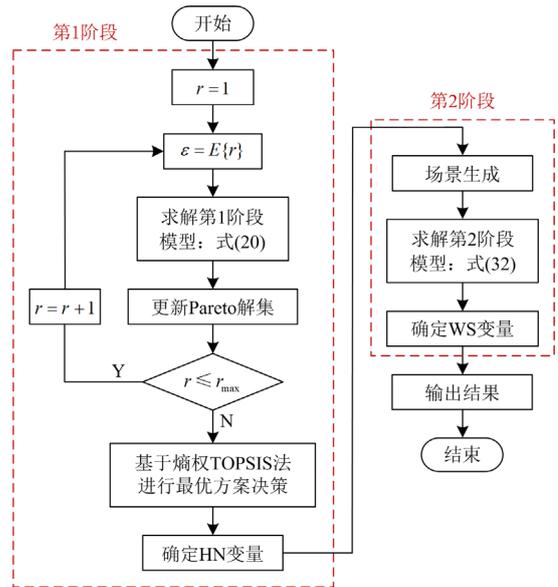


图 3 所提方法流程图

Fig. 3 Flowchart of proposed method

## 5 算例仿真

### 5.1 算例情况

本文采用修改的 IEEE33 节点系统进行优化分析, 系统中接入了 3 个 PV 和 2 组 CB, 同时设置了 4 个 FL 参与无功优化, 算例拓扑结构如图 4 所示。

3 个 PV 的接入点分别为 10、14 和 31, 其额定容量均为 1.5 MVA, 功率因数最小值为 0.95。

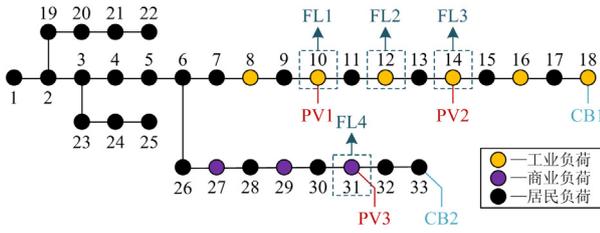


图 4 修改的 IEEE33 节点系统拓扑图

Fig. 4 Topology of modified IEEE 33-bus system

2 组 CB 的接入点分别为 18 和 33, 其安装组数均为 25 组, 单组容量均为 30 kvar。此外, 每组 CB 一天内允许的最大动作次数  $N_{i,c}^{\max}$  为 5 次。

系统中 33 个节点所接负荷为工业负荷、商业负荷和住宅负荷 3 种负荷类型之一。33 个负荷 24 h 的有功和无功功率预测值来自 33 个对应类型的 10 kV 专公变实际负荷数据。基于第 1 节分析, 所有的工业负荷和商业负荷被视作拥有无功独立调节能力的负荷, 设置节点 10、12、14 和 31 所接负荷参与无功优化, 其功率因数最小值为 0.9。

在初始场景中, PV 和负荷的功率预测值如图 5 所示。不难看出: 在 08:00—16:00 时段, PV 出力超过了相同时刻 70% 的负荷总量, 容易发生功率倒送导致电压越上限, 因此该时段内 CB 宜切除运行, PV 和 FL 应被调度吸收无功以抑制电压上升; 在 19:00—5:00 时段, PV 出力为 0 MW 而负荷较高, 容易导致电压越下限, 因此该时段内 CB 宜投入运行, PV 和 FL 应被调度发出无功以抑制电压下降。

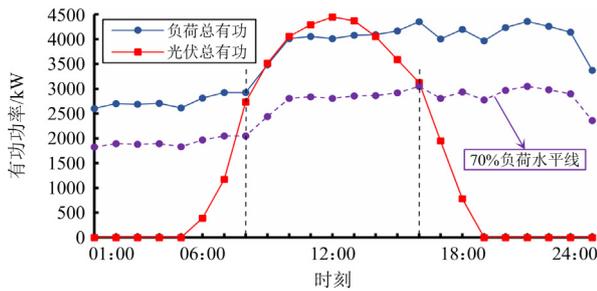


图 5 PV 和负荷的功率预测值

Fig. 5 Predicted power value of PVs and loads

本文算例采用的时间尺度为一天 24 h, 时间间隔为 1 h, 调度总时段  $T$  为 24。在第 2 阶段中, PV 和负荷服从以初始场景为均值、标准差为 10% 均值的高斯分布<sup>[20-22]</sup>, 由蒙特卡洛法采样并生成 100 个随机场景。此外, 所有节点的电压基准值  $V_i^{\text{ref}}$  设为 1.0 p.u.; 所有节点的电压幅值上下限, 即  $V_{i,\max}$ 、 $V_{i,\min}$

分别设为 1.07 p.u.、0.93 p.u.; 所有节点当发生电压越限时不能超过电压幅值的上下限,  $\overline{V_{i,\lim}}$ 、 $\underline{V_{i,\lim}}$  分别设为 1.1 p.u.、0.9 p.u.。

基于本文所提模型, 在 Matlab R2021b 上进行编程, 利用 Yalmip 工具包及 GUROBI 求解器进行建模和求解, 硬件环境为 Intel(R) Core(TM) i7-8750H CPU @ 2.20 GHz 处理器, 8 GB 内存。

## 5.2 优化结果分析

### 5.2.1 第 1 阶段无功优化

首先, 按照 4.2 节所述流程, 根据初始场景进行第 1 阶段无功优化。设置一天内 FL 无功调度次数的最大值  $\varepsilon$  取值集合  $E$  为 {1,2,3,4,5}, 将不同的  $\varepsilon$  依次代入式(20)进行优化求解, 并记录每次优化所得目标函数  $f_1$ 。在  $\varepsilon$  遍历  $E$  后, 利用熵权 TOPSIS 法计算 Pareto 解集中各组解的贴近度。此外, 为验证模型的准确性, 定义松弛误差指标为<sup>[30]</sup>

$$e_{ij}^{t,s} = |(P_{ij}^{t,s})^2 + (Q_{ij}^{t,s})^2 - \tilde{l}_{ij}^{t,s} \cdot \tilde{v}_i^{t,s}| \quad (43)$$

同时记录每次优化结果中各支路最大松弛误差。第 1 阶段无功优化的 Pareto 解集如表 1 所示。

表 1 第 1 阶段无功优化的 Pareto 解集

Table 1 Pareto solution set of the first stage reactive power optimization

$\varepsilon$	电压偏差/p.u.	贴近度	最大松弛误差
1	37.1331	0.5420	$2.1699 \times 10^{-6}$
2	37.0806	0.7356	$2.1708 \times 10^{-6}$
3	37.0740	0.6163	$1.8540 \times 10^{-6}$
4	37.0699	0.5037	$1.5724 \times 10^{-6}$
5	37.0598	0.4580	$2.1954 \times 10^{-6}$

由表 1 中的结果不难看出: FL 无功调度次数  $\varepsilon$  越大, 电压偏差越小, 电压质量越好。根据每次优化结果计算得到的最大松弛误差均为  $10^{-6}$  数量级, 精度满足实际工程的应用要求。此外, 根据熵权 TOPSIS 法计算结果可知,  $\varepsilon$  取 2 得到的解的贴近度最大, 故而选为最优折衷解。

为了更直观地展示 TOPSIS 法的决策依据, 将 4.1 节中的步骤 3 作为展示对象, 如图 6 所示。由图 6 可知:

1) 5 个实心圆点分别对应 Pareto 解集的 5 组解, 第  $a$  组解的坐标为评价矩阵  $G$  中第  $a$  行的元素, 即  $(g_{a1}, g_{a2})$ , 其横、纵坐标分别为经 4.1 节中步骤 1、步骤 2 处理后的 FL 无功调度次数和电压偏差,  $G$  由根据 Pareto 解集构建的初始评价矩阵  $H$  经式 (33)~式(39)的一系列计算得到, 可表示为

$$H = \begin{bmatrix} 1 & 37.1331 \\ 2 & 37.0806 \\ 3 & 37.0740 \\ 4 & 37.0699 \\ 5 & 37.0598 \end{bmatrix} \Rightarrow G = \begin{bmatrix} 0.3559 & 0 \\ 0.2669 & 0.2154 \\ 0.1779 & 0.2425 \\ 0.089 & 0.2593 \\ 0 & 0.3007 \end{bmatrix} \quad (44)$$

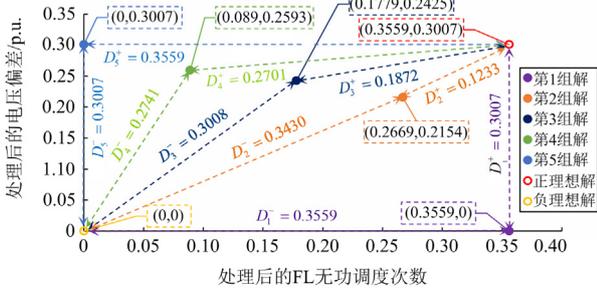


图 6 TOPSIS 法示意图

Fig. 6 Schematic diagram of TOPSIS method

2) 2 个空心圆点分别为由式(40)求得的正、负理想解, 各组解至正(负)理想解的欧氏距离, 即  $D_a^+$  ( $D_a^-$ ) 标注在各组解至正(负)理想解的连线上,  $D_a^+$  ( $D_a^-$ ) 越小(大)表明解越好,  $D_a^+$  中最小值为  $D_2^+ = 0.1233$ ,  $D_a^-$  中最小值为  $D_1^- = 0.3559$ , 此时无法做出最终决策。

3) 贴近度指标  $C_a$  综合考虑了  $D_a^+$  和  $D_a^-$ , 结合式(42)不难看出, 越好的解  $C_a$  越大, 经过计算可知  $C_a$  中最大值为  $C_2 = 0.7356$ , 故将第 2 组解选为最优折衷解。

第 1 阶段无功优化确定了模型中的 HN 变量, 即  $n_{i,C}^{t,0}$ 、 $n_{i,FL}^{t,0}$  分别反映了 CB 的动作情况和 FL 的无功调度计划, 具体情况如图 7、表 2 所示。

由图 7 可知, 在 08:00—16:00 时段 PV 出力较大, 电压越上限情况严重, CB2 全部切除以防止电压进一步上升; CB1 所在线路中接入了两个 PV, 电压越限情况较 CB2 所在线路更加恶劣, 因此其切除时间为 07:00—17:00, 较 CB2 切除时间更长。CB 的补偿情况同 5.1 节根据图 5 所预想的基本一致。

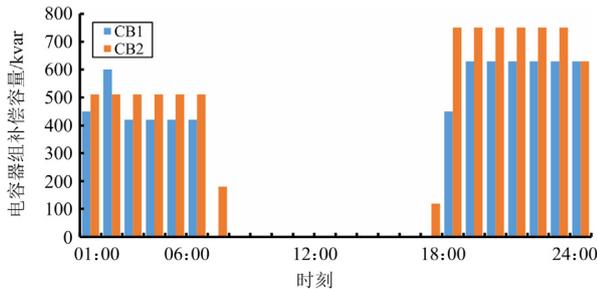


图 7 CB 补偿容量

Fig. 7 Compensation capacity of CBs

表 2 FL 无功调度计划

Table 2 Reactive scheduling plan of FLs

负荷名称	FL 无功调度计划			
	12:00	13:00	14:00	其他时段
FL1	1	1	0	0
FL2	1	0	1	0
FL3	1	1	0	0
FL4	1	1	0	0

由表 2 可知, 由于限制了 FL 无功调度的次数, 其均在 12:00—14:00 时段被调度吸收无功以抑制电压上升。4 个 FL 的无功调度计划也同 5.1 节中根据图 5 所预想的基本一致。

### 5.2.2 第 2 阶段无功优化

在第 1 阶段无功优化确定 HN 变量的情况下, 按照 4.2 节所述流程生成 100 个场景, 进行第 2 阶段无功优化。以 100 个场景下所得 WS 变量(PV 吸收无功量  $Q_{i,PV}^{t,s}$ 、FL 吸收无功量  $\Delta Q_{i,FL}^{t,s}$ )优化结果的期望值作为仿真结果, 如图 8 所示。

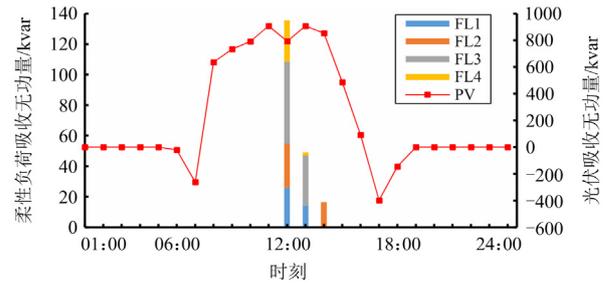


图 8 PV 和 FL 无功调度量的期望值

Fig. 8 Expected reactive power scheduling of PVs and FLs

由图 8 可知, 4 个 FL 根据第 1 阶段所制定的无功调度计划, 在 12:00—14:00 时段吸收无功以抑制电压上升。根据式(27)的约束可知, 当 PV 有功出力为 0 时, 其没有无功调节能力, 因此在 19:00—05:00 时段 PV 无功调度量恒为 0; 在 08:00—16:00 时段 PV 处于进相运行状态, 吸收无功以抑制电压上升; 在其余时段, 当 PV 出力较小时, PV 处于迟相运行状态, 发出部分无功以抬高电压。

### 5.3 有效性验证

为验证所提模型的有效性, 在 5.2 节无功优化算例的基础上, 额外设置如下 3 个情形。

情形 1: 不考虑无功优化措施。

情形 2: 考虑 CB 和 PV 的无功优化。

情形 3: 考虑 CB、PV 和 FL 的无功优化。

其中, 情形 3 为 5.2 节所述算例; 情形 1 为基准情形, 不考虑无功优化措施对系统进行潮流计算;

情形 2 在无功优化中考虑了 CB 和 PV, 采用本文所述两阶段无功随机优化调度方法进行优化, 且第 2 阶段的随机场景和情形 3 相同。记录各情形下  $f_1$  和  $f_2$  的值以及连同初始场景在内的 101 个场景中的电压越限总数, 并根据式(43)计算情形 2 和情形 3 两阶段优化中的最大松弛误差, 结果如表 3 所示。

表 3 不同情形下的优化结果

Table 3 Optimal results in different cases

情形	$f_1$	$f_2$	电压越限总数	最大松弛误差
1	67.8336	67.9591	22 406	—
2	37.3116	37.0637	907	$2.1767 \times 10^{-6}$
3	37.0815	36.8610	306	$2.6336 \times 10^{-6}$

由表 3 结果可知, 随着控制手段的不断增多, 电压偏差  $f_1$ 、 $f_2$  和电压越限总数均不断减小, 且情形 2 和情形 3 的优化结果中最大松弛误差在精度上均满足实际工程的应用要求。算例中共  $N_s \times n \times T$  (即  $101 \times 33 \times 24 = 79\,992$ ) 个节点电压场景, 情形 3 在情形 2 的基础上进一步考虑 FL 的无功调度, 电压越限总数由 907 下降至 306, 较情形 2 减少了 66.24%, 电压质量得到了较好的改善。为了更直观地展示 FL 的无功调度对电压质量的改善, 选取某个场景 12:00 时的电压优化结果作为展示对象, 如图 9 所示。

图 9 为某场景下 12:00 时节点电压优化结果, 不难看出, 情形 2 已使节点电压有了明显的改善。情形 3 在情形 2 的基础上增加了 FL 的无功调度, 使得 FL1、FL2、FL3 所在支路节点(节点 6—节点 18)和 FL4 所在支路节点(节点 26—节点 33)的电压进一步降低, 向基准值 1.0 p.u. 靠近, 同时使节点 13—节点 18 的电压不再越限, 越限最严重的节点 14 由 1.0761 p.u. 降至 1.0690 p.u., 解决了全部的电压越上限问题。

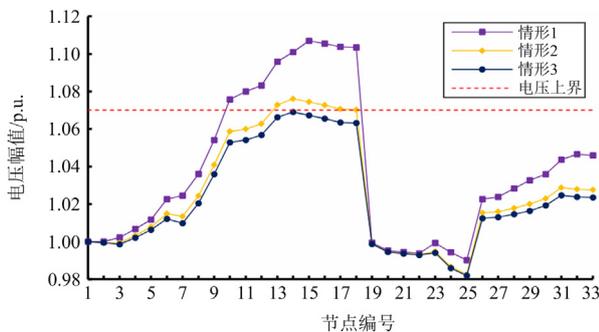


图 9 某场景下 12:00 时节点电压优化结果

Fig. 9 Optimization results of node voltage at 12:00 in a scenario

## 6 结语

本文针对高比例分布式 PV 并网所引起的电压越限问题, 考虑 FL 的无功调节能力, 提出了配网日前两阶段无功随机优化调度方法。模型中设置了电压偏差最小化和 FL 的无功调度次数最小化两种目标函数, 采用  $\varepsilon$  约束法进行求解, 并利用熵权 TOPSIS 法选择最优折衷解。为验证所提方法的有效性, 在修改的 IEEE33 节点系统中进行算例分析, 结果表明: 1) 在日前的无功优化调度中考虑 FL 后, 两阶段的电压偏差均下降了约 0.22 p.u., 电压越限总数减少了 66.24%, 电压质量得到了较为明显的改善, 且改善效果会随着 FL 无功调度次数的增加而提升; 2) 在高比例分布式 PV 接入配网的背景下, FL 的无功倾向于在 PV 出力较大的午间被调度, 可以有效地缓解电压越上限的问题。

本文构建的配网日前两阶段无功随机优化调度模型, 通过设立无功调度次数最小化这一目标间接地考虑了无功调度的成本, 但未深入研究 FL 无功辅助服务的定价。FL 参与无功辅助服务背景下的 FL 无功定价问题将是下一步的研究方向。

## 参考文献

- [1] 黄伟, 刘斯亮, 王武, 等. 长时间尺度下计及光伏不确定性的配电网无功优化调度[J]. 电力系统自动化, 2018, 42(5): 154-162.  
HUANG Wei, LIU Siliang, WANG Wu, et al. Optimal reactive power dispatch with long-time scale in distribution network considering uncertainty of photovoltaic[J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(5): 154-162.
- [2] 路畅, 郭力, 柴园园, 等. 含高渗透分布式光伏的增量配电网日前优化调度方法[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(18): 90-98.  
LU Chang, GUO Li, CHAI Yuanyuan, et al. Day-ahead optimal scheduling method for incremental distribution network with high penetration of distributed photovoltaic[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(18): 90-98.
- [3] 胡丹尔, 李子晨, 彭勇刚, 等. 含电动汽车充电桩的配电网深度强化学习有功-无功协调电压控制策略[J/OL]. 电网技术: 1-11[2022-12-10]. <https://doi.org/10.13335/j.1000-3673.pst.2022.0814>.  
HU Dan'er, LI Zichen, PENG Yonggang, et al. Deep reinforcement learning active-reactive coordinated voltage control strategy for distribution network with electric vehicle charging[J/OL]. Power System Technology: 1-11[2022-12-10]. <https://doi.org/10.13335/j.1000-3673.pst.2022.0814>.

- [4] CHEN L, DENG Z, XU X. Two-stage dynamic reactive power dispatch strategy in distribution network considering the reactive power regulation of distributed generations[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2019, 34(2): 1021-1032.
- [5] 郭清元, 吴杰康, 莫超, 等. 基于混合整数二阶锥规划的新能源配电网电压无功协同优化模型[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(5): 1385-1396.
- GUO Qingyuan, WU Jiekang, MO Chao, et al. A model for multi-objective coordination optimization of voltage and reactive power in distribution networks based on mixed integer second-order cone programming[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(5): 1385-1396.
- [6] 黄祖委, 黄智鹏, 杨夏, 等. 含源配电网的无功电压分段自适应自治控制策略[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(9): 10-18.
- HUANG Zuwei, HUANG Zhipeng, YANG Xia, et al. Reactive voltage control strategy based on adaptive autonomous segment for distribution network with sources[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(9): 10-18.
- [7] ZHANG L, TANG W, LIANG J, et al. Coordinated day-ahead reactive power dispatch in distribution network based on real power forecast errors[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2016, 31(3): 2472-2480.
- [8] 刘洪, 徐正阳, 葛少云, 等. 考虑储能调节的主动配电网有功—无功协调运行与电压控制[J]. 电力系统自动化, 2019, 43(11): 51-58.
- LIU Hong, XU Zhengyang, GE Shaoyun, et al. Coordinated operation of active-reactive power and voltage control for active distribution network considering regulation of energy storage[J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(11): 51-58.
- [9] KRATA J, SAHA T K. Real-time coordinated voltage support with battery energy storage in a distribution grid equipped with medium-scale PV generation[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2019, 10(3): 3486-3497.
- [10] 徐韵, 颜湘武, 李若瑾, 等. 电力市场环境下的“源—网—荷—储”互动的主动配电网有功/无功联合优化[J]. 电网技术, 2019, 43(10): 3778-3789.
- XU Yun, YAN Xiangwu, LI Ruojin, et al. Joint optimization of active and reactive powers in active distribution network with “generation-grid-load-energy storage” interaction in power market environment[J]. Power System Technology, 2019, 43(10): 3778-3789.
- [11] 齐宁, 程林, 田立亭, 等. 考虑柔性负荷接入的配电网规划研究综述与展望[J]. 电力系统自动化, 2020, 44(10): 193-207.
- QI Ning, CHENG Lin, TIAN Liting, et al. Review and prospect of distribution network planning research considering access of flexible load[J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(10): 193-207.
- [12] YANG H, ZHANG X, MA Y, et al. Critical peak rebate strategy and application to demand response[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2021, 6(3): 357-370.
- [13] TROVATO V, TENG F, STRBAC G. Role and benefits of flexible thermostatically controlled loads in future low-carbon systems[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2018, 9(5): 5067-5079.
- [14] 陈长青, 阳同光. 计及柔性负荷的电网储能和光伏协调规划研究[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(4): 169-177.
- CHEN Changqing, YANG Tongguang. Research on grid energy storage and photovoltaic coordination planning with flexible load[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(4): 169-177.
- [15] PATERAKIS N G, ERDINC O, CATALAO J P S. An overview of demand response: key-elements and international experience[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2017, 69: 871-891.
- [16] 明梦君, 张涛, 王锐, 等. 混合可再生能源系统多目标优化综述[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(10): 2908-2917, 3141.
- MING Mengjun, ZHANG Tao, WANG Rui, et al. Review of multi-objective optimization for hybrid renewable energy system[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(10): 2908-2917, 3141.
- [17] MAVROTAS G. Effective implementation of the epsilon-constraint method in multi-objective mathematical programming problems[J]. Applied Mathematics and Computation, 2009, 213(2): 455-465.
- [18] 郑能, 丁晓群, 郑程拓, 等. 含高比例光伏的配电网有功—无功功率多目标协调优化[J]. 电力系统自动化, 2018, 42(6): 33-39, 91.
- ZHENG Neng, DING Xiaoqun, ZHENG Chengtuo, et al. Multi-objective coordinated optimization of active and reactive power for distribution network integrated with high proportion of photovoltaic generation[J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(6): 33-39, 91.
- [19] 徐潇源, 王晗, 严正, 等. 能源转型背景下电力系统不确定性及应对方法综述[J]. 电力系统自动化, 2021, 45(16): 2-13.
- XU Xiaoyuan, WANG Han, YAN Zheng, et al. Overview of power system uncertainty and its solutions under energy transition[J]. Automation of Electric Power

- Systems, 2021, 45(16): 2-13.
- [20] LI Z, ZANG C, ZENG P, et al. Combined two-stage stochastic programming and receding horizon control strategy for microgrid energy management considering uncertainty[J]. Energies, 2016, 9(7).
- [21] 李秋燕, 王利利, 丁岩, 等. 考虑光伏不确定性的安全约束机组组合[J]. 电力自动化设备, 2016, 36(11): 101-106.
- LI Qiuyan, WANG Lili, DING Yan, et al. Security-constrained unit commitment considering PV output uncertainty[J]. Electric Power Automation Equipment, 2016, 36(11): 101-106.
- [22] 符杨, 廖剑波, 李振坤, 等. 考虑越限风险的主动配电网日前优化调度及运行[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(21): 6328-6338.
- FU Yang, LIAO Jianbo, LI Zhenkun, et al. Day-ahead optimal scheduling and operating of active distribution network considering violation risk[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(21): 6328-6338.
- [23] ZHENG Q P, WANG J, LIU A L. Stochastic optimization for unit commitment—a review[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2015, 30(4): 1913-1924.
- [24] 王蓓蓓, 仇知, 丛小涵, 等. 基于两阶段随机优化建模的新能源电网灵活性资源边际成本构成的机理分析[J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(4): 1348-1359, 1541.
- WANG Beibei, QIU Zhi, CONG Xiaohan, et al. Mechanism analysis of flexible resources' marginal price in new energy grid based on two-stage stochastic optimization modeling[J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(4): 1348-1359, 1541.
- [25] 卢姬, 常俊晓, 张云阁, 等. 考虑 DG 不确定性的主动配电网两阶段无功机会约束优化方法[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(21): 28-35.
- LU Ji, CHANG Junxiao, ZHANG Yunge, et al. Two-stage reactive power chance-constrained optimization method for an active distribution network considering DG uncertainties[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(21): 28-35.
- [26] 张海波, 申杰, 王国荣, 等. 考虑无功设备动作的交直流电网日前两阶段随机优化调度[J]. 电力系统自动化, 2022, 46(8): 133-142.
- ZHANG Haibo, SHEN Jie, WANG Guorong, et al. Day-ahead two-stage stochastic optimal dispatch of AC/DC power grid considering reactive power equipment operation[J]. Automation of Electric Power Systems, 2022, 46(8): 133-142.
- [27] 贡韞韵, 董海鹰, 陈钊, 等. 考虑随机性及光热电站参与的多源发电系统两阶段随机优化调度[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(4): 30-38.
- YUN Yunyun, DONG Haiying, CHEN Zhao, et al. A two-stage stochastic scheduling optimization for multi-source power system considering randomness and concentrating solar power plant participation[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(4): 30-38.
- [28] NAZIR F U, PAL B C, JABR R A. A two-stage chance constrained volt/var control scheme for active distribution networks with nodal power uncertainties[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2019, 34(1): 314-325.
- [29] 杨明, 罗隆福. 计及风电与负荷不确定性的电力系统无功随机优化调度[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(19): 134-141.
- YANG Ming, LUO Longfu. Stochastic optimal reactive power dispatch in a power system considering wind power and load uncertainty[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(19): 134-141.
- [30] 马鑫, 郭瑞鹏, 王蕾, 等. 基于二阶锥规划的交直流主动配电网日前调度模型[J]. 电力系统自动化, 2018, 42(22): 144-150.
- MA Xin, GUO Ruipeng, WANG Lei, et al. Day-ahead scheduling model for AC/DC active distribution network based on second-order cone programming[J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(22): 144-150.
- [31] 沈国辉, 陈光, 赵宇, 等. 基于双目标分层优化和TOPSIS 排序的电动汽车有序充电策略[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(11): 115-123.
- SHEN Guohui, CHEN Guang, ZHAO Yu, et al. Orderly charging optimization strategy of an electric vehicle based on double objective hierarchical optimization and TOPSIS ranking[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(11): 115-123.
- [32] 卢锦玲, 张津, 丁茂生. 含风电的电力系统调度经济性评价[J]. 电网技术, 2016, 40(8): 2258-2264.
- LU Jinling, ZHANG Jin, DING Maosheng. Economic evaluation of power system dispatch integrated with wind power[J]. Power System Technology, 2016, 40(8): 2258-2264.

收稿日期: 2022-12-14; 修回日期: 2023-03-02

作者简介:

黄昊(1999—), 男, 硕士研究生, 研究方向为电力系统运行与优化; E-mail: 22110015@zju.edu.cn

吴浩(1973—), 男, 通信作者, 博士, 副教授, 研究方向为电力系统分析与控制以及负荷特性分析、建模及调控。E-mail: zjuwuhao@zju.edu.cn

(编辑 许威)