# 基于空间近似的主动配电网灵活性区间优化调度

### 张胜飞,刘 毅

(中国电力工程顾问集团西南电力设计院有限公司,四川成都 610021)

摘 要:高比例新能源并网使得电力系统的不确定性水平显著增高,现有仿射潮流计算中非线性运算新增噪声元将 导致计算结果产生过于悲观的界限,从而增大结果的保守性。针对上述问题,提出一种基于空间近似的主动配电网 灵活性区间优化调度方法。首先,引入空间近似逼近法对仿射非线性运算进行修正,得到保守性更低的改进仿射运 算法,并将其引入配电网潮流计算中;其次,构建主动配电网运行灵活性需求模型以及各灵活性资源供给模型;接着, 以系统运行经济性、净负荷波动率和运行灵活性裕度为目标,构建主动配电网区间多目标优化调度模型;最后,在 IEEE 33 节点系统中分别对比所提出的基于空间近似的仿射潮流计算与传统潮流计算和蒙特卡洛模拟法的结果。结 果显示,所提方法具有更低的保守性,区间结果可以为配电系统调度人员提供良好的参考价值。 关键词:高比例新能源;主动配电网;仿射潮流计算;灵活性资源 中图分类号:TM 73 文献标志码:A 文章编号:1003-6954(2025)02-0046-09

DOI:10.16527/j.issn.1003-6954.20250207

# Flexible Interval Optimal Dispatching of Active Distribution Network Based on Spatial Approximation

ZHANG Shengfei, LIU Yi

(Southwest Electric Power Design Institute Co., Ltd. of China Power Engineering Consulting Group, Chengdu 610021, Sichuan, China)

Abstract: The high proportion of new energy connected to power grid has significantly increased the level of uncertainty in power system. The addition of noise elements in nonlinear operations in the existing affine power flow calculations will lead to overly pessimistic limits on the calculation results, thereby increasing the conservatism of the results. In response to the above problems, a flexible interval optimal dispatching method for active distribution network based on spatial approximation is proposed. Firstly, the spatial approximation method is introduced to modify the affine nonlinear operation, and an improved affine operation algorithm with less conservatism is obtained, which is introduced into power flow calculation of distribution network. Secondly, the models of operational flexibility requirements and each flexibility resource supply are constructed for active distribution network. And then, taking the system operating economy, net load fluctuation rate and operating flexibility margin as the goals, an interval multi-objective optimal dispatching model for active distribution network is established. Finally, in IEEE-33 node system the results of the proposed affine power flow calculation based on spatial approximation are compared with the traditional power flow calculation and Monte Carlo simulation method. The results show that the proposed method has less conservatism, and the interval results can provide good reference value for distribution system dispatchers.

Key words: high proportion of new energy; active distribution network; affine power flow calculation; flexibility resources

0 引 言

随着配电网的发展和转型,其呈现出高比例可

再生能源(renewable energy source, RES)的主动配 电网(active distribution network, ADN)形式<sup>[1]</sup>。这 种供电结构不仅仅是单一的电网供电, 而是更多地 提供大规模可再生能源供电。高比例的可再生能源 使得电力系统的不确定性水平显著增高,并被广泛 关注<sup>[2]</sup>。相对于确定性潮流计算,不确定性潮流计 算能够充分考虑到各种不确定性因素的影响,可更 为有效地给电力系统提供支持<sup>[3]</sup>。

区间潮流作为不确定性潮流计算的重要方法之 一,其运算过程简洁高效,能够在多重不确定性因素 共同作用下获得潮流区间结果[4-5]。不过,与其他 技术相比,区间潮流并不能充分明确各种不确定因 素的影响,并且往往倾向于过度保守<sup>[6]</sup>。为了应对 这一难题,作为区间潮流的扩展方法——仿射潮流, 将功率的不确定性表示为中心值和噪声元的线性组 合形式。仿射潮流与区间潮流有所不同,它采用噪 声元素来单独考虑各种不确定性因素的影响,因此 更能明确不确定性变量之间的相关性。目前,仿射 潮流用于处理特定的源荷不确定性情景时,其处理 步骤包括确定注入含不确定性功率的中心值和噪声 元系数,并运用高斯迭代法<sup>[7]</sup>、前推回代法<sup>[8]</sup>、牛顿 迭代法<sup>[9]</sup>以及优化求解<sup>[10]</sup>等技术,以获得相应情景 下系统潮流区间的分布情况。文献[11]将前推回 代法和复仿射运算结合构建了复仿射潮流计算,并 与蒙特卡洛(Monte Carlo, MC)模拟法的抽样计算 结果对比,论证了引入仿射能保证计算结果的完备 性和保守性。然而,仿射算术中非线性运算会导致 运算结果的保守性增加,从而增大计算的误差<sup>[12]</sup>。 文献[13]采用切比雪夫近似法对仿射乘法运算进 行了改进,简化了新增噪声元系数的求解,然而 在计算规模较大时该方法的复杂度将急剧增大。文 献[14] 通过仿射除法的线性化, 使得区间结果包含 的误差更少、区间解更加精确,但忽略了计算效率。 文献[15]引入区间泰勒公式对仿射除法运算进行 改进,缩小了运算的保守性,然而并未对仿射乘法运 算进行改进。因此,确保运算结果完备性的同时减 小保守性,成为了当前仿射运算研究的重点。

随着新能源和分布式能源的大规模接入以及用 户需求的变化,电力系统对灵活性的需求越来越 高<sup>[16-17]</sup>。国内外许多学者陆续提出了不同的灵活 性评价指标,在定性和定量分析电力系统灵活性方 面进行了广泛的研究<sup>[18-21]</sup>。文献[22]基于经济和 技术因素提出了技术不确定灵活性指标和经济不 确定灵活性指标。文献[23]重点研究了电力系统 灵活性评估方法,并将该方法应用于电力市场。文 献[24]构建了大规模风电并网条件下电力系统灵 活性的定量评价指标体系,采用 MC 模拟方法建立 了经济调度模型,定量计算了灵活性指标。上述研 究利用随机场景优化得到概率型的灵活性评估结 果,适用于长时间尺度运行或者规划层面;而对于日 前和日内的短期运行,难以确定系统在应对一定区 域的风电波动时的灵活性,并难以保证鲁棒性。区 间算术能更简洁直观地表征电力系统灵活性特性, 并保证较好的鲁棒性<sup>[25-26]</sup>。

综上所述,如何在含高渗透率可再生能源的主动配电网中实现保守性更低的不确定性仿射潮流计算,同时既保证功率平衡又考虑主动配电网运行灵活性值得深入研究。因此,下面以系统运行经济性、净负荷波动率和运行灵活性裕度为目标,提出一种基于空间近似法的主动配电网灵活性区间优化调度方法,并验证了该方法的有效性和正确性。

# 1 基于最小空间近似的改进仿射算术

## 1.1 仿射算术

在仿射算术中,不确定量用中心值和一组噪声 元的线性组合来表示,既能辨识不确定性因素的来 源,还可以表征不确定变量之间的依赖关系,有效改 善区间过度扩张的问题,其表达式为

$$\hat{x} = x_0 + x_1 \varepsilon_1 + \dots + x_n \varepsilon_n = x_0 + \sum_{i=1}^n x_i \varepsilon_i \quad (1)$$

式中:顶标"<sup>\*</sup>"表示仿射量;  $x_0$  为仿射数  $\hat{x}$  中点值;  $\varepsilon_1, \varepsilon_i, \varepsilon_n$  为噪声元,其值均为 [-1,1] 且相互独 立;  $x_1, x_i, x_n$  为对应各个噪声元的实数系数。

给定两个仿射数 $\hat{x} = x_0 + x_1\varepsilon_1 + \dots + x_n\varepsilon_n$ 和 $\hat{y} = y_0 + y_1\varepsilon_1 + \dots + y_n\varepsilon_n$ ,仿射算术的基本运算规则为:  $\hat{x} \pm \hat{y} = (x_0 \pm y_0) + (x_1 \pm y_1)\varepsilon_1 + \dots + (x_n \pm y_n)\varepsilon_n$ (2)

$$\hat{kx} = kx_0 + k\sum_{i=1}^n x_i\varepsilon_i$$
(3)

$$\hat{x} \pm k = x_0 \pm k + \sum_{i=1}^n x_i \varepsilon_i$$
(4)

$$\hat{x} \times \hat{y} = x_0 y_0 + \sum_{i=1}^n (x_0 y_i + y_0 x_i) \varepsilon_i + \left(\sum_{i=1}^n |x_i|\right) \times \left(\sum_{i=1}^n |y_i|\right) \varepsilon_{n+1}$$
(5)

式中:k为常量; $\varepsilon_{n+1}$ 为新增噪声元。

对于除法运算 $\hat{x}/\hat{y}$ 则将其转化为 $\hat{x} \times (1/\hat{y})$ 进

行求解,仿射倒数运算为

$$1/\hat{y} = \alpha \hat{y} + \beta + \delta \varepsilon_{n+1}$$

$$\begin{cases} \alpha = -1/ab \\ \beta = 1/2a + 1/2b + 1/\sqrt{ab} \\ \delta = 1/2a + 1/2b - 1/\sqrt{ab} \end{cases}$$
(6)

式中,a、b为仿射变量 $\hat{y}$ 对应的区间上、下限值。

#### 1.2 基于最小空间近似的改进仿射算术

由仿射算术的运算规则可知,仿射非线性运算 将会产生额外的二次项噪声元 *ε*<sub>n+1</sub>,而新增噪声元 往往采用易于计算的系数,这会导致计算结果产生 过于悲观的界限,从而增大结果的保守性。因此,引 入最小空间近似逼近法对仿射非线性运算进行改 进,使得仿射非线性运算可以得到更为保守的界限。

将仿射非线性运算近似为 $\hat{z} = f(\hat{x}, \hat{y})$ ,其表达 式为

$$\hat{z} = A\hat{x} + B\hat{y} + C + D\varepsilon \tag{7}$$

式中: *ε* 为新增噪声元; *A*、*B*、*C*、*D* 为空间近似逼近 法所确定的常数。

从几何角度来看,空间近似逼近法可以看作是在 (x, y, z)空间中找到两个平行平面,使得它们之间的 体积由  $U^{xy} = \{ [x], [y] \}$ 给出的域上的表面尽可能 紧密地包围,如图 1 所示。这可以表述为

 $\min C_1 \quad \text{and} \quad \max C_2$   $\begin{cases} z \ge Ax + By + C_2 \\ z \le Ax + By + C_1 \quad x, y \in U^{xy} \\ C_1 < C_2 \end{cases}$ (8)





将式(8)代人式(7)中,则仿射非线性运算公式为  $\hat{z} = A\hat{x} + B\hat{y} + 0.5(C_1 + C_2) + 0.5(C_1 - C_2)\varepsilon$ (9)

通过计算两个平面的值,使它们尽可能地接近, 同时仍然包含所有<sup>2</sup>的相关值。

为了简化问题,把A和B固定为中心点的偏导值,即:

$$A = \frac{\partial}{\partial x} z(x_0, y_0) \tag{10}$$

$$B = \frac{\partial}{\partial y} z(x_0, y_0) \tag{11}$$

进一步将两个平面参数计算简化为

$$\begin{cases} C_1 = \max \, d(x, y) \\ C_2 = \min \, d(x, y) \\ d(x, y) = z - (Ax + By) \end{cases} \quad x, y \in U^{xy} \quad (12)$$

式中,*d*()为距离函数,表征两个平面与仿射非线性运算值ź的距离。通过计算距离函数的最值,即可确定两个平面的截距。

为了给出空间近似逼近法在仿射非线性运算中 的具体应用,以仿射乘法为例(除法处理方式类 似),其计算过程为:

$$A = \frac{\partial}{\partial x}(x, y) (x_0, y_0) = y_0$$
(13)

$$B = \frac{\partial}{\partial y}(x, y) (x_0, y_0) = x_0$$
(14)

距离函数为

 $d(\hat{x}, \hat{y}) = \hat{x} \times \hat{y} - (y_0 \hat{x} + x_0 \hat{y}) =$ 

$$\left(\sum_{i} x_i \varepsilon_i\right) \left(\sum_{i} y_i \varepsilon_i\right) - x_0 y_0$$
 (15)

参数  $C_1$ 和  $C_2$ 由联合范围内距离函数的极值得到。 假设  $u = x - x_0 = \sum x_i \varepsilon_i$ 和  $v = y - y_0 = \sum y_i \varepsilon_i$ ,由于

 $x_0y_0$ 为固定常数,因此,当uv取得极值的同时, 距离函数也取得极值。并且, $U^{uv}$ 和 $U^{sy}$ 具有相同的 可行域, $U^{uv}$ 的中心位于(0,0)。由于u和v均为连 续单调的,因此容易证明uv的极值只能出现在任意 封闭区域的边界上。鉴于此,只需要扫描多边形的 边缘,并且也只需要扫描任何边缘上的 3 个点,即两 个端点和v = c/(2b)处,其中边缘线的方程为au + bv = c。

假设求解得到 uv 的极值分别为  $p = \min(uv)$  和  $q = \max(uv)$ ,则改进仿射算术可以近似为  $\hat{z} = y_0 \hat{x} + x_0 \hat{y} - x_0 y_0 + (p+q)/2 + (q-p)\varepsilon/2$ 

## (16)

# 2 主动配电网运行灵活性分析与指标 构建

随着高渗透率分布式电源和大规模电动汽车 (electric vehicle, EV)的接入,配电网正在经历转型 和快速发展,这也导致了多样性和不确定性成为配 电网的主要特征。

### 2.1 大规模 EV 充电负荷区间模型

根据 EV 出行和充电规律构建 EV 充电负荷的

不确定性区间模型。

1) EV 起始充电时刻 t<sub>arr</sub>

$$f(t_{\rm arr}) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_{\rm m}^2}} \exp\left(\frac{\left(t_{\rm arr} - \mu_{\rm m}\right)^2}{2\sigma_{\rm m}^2}\right) \qquad (17)$$

式中: $f(t_{arr})$ 为 EV 充电时刻概率分布函数; $\mu_m$ 为充 电开始时间的均值,这里取 19<sup>[27]</sup>; $\sigma_m$ 为充电开始时 间的标准差,这里取 2<sup>[27]</sup>。

2) EV 日行驶里程  $R_{d}$ 

EV 日行驶里程符合对数正态概率密度分布。

$$f(R_{\rm d}) = \frac{1}{R_{\rm d}\sqrt{2\pi\sigma_{\rm d}^2}} \exp\left(\frac{-\left(\ln R_{\rm d} - \mu_{\rm d}\right)^2}{2\sigma_{\rm d}^2}\right) \quad (18)$$

式中: $f(R_d)$ 为 EV 日行驶里程概率分布函数; $\mu_d$ 为 日行使里程的均值,这里取 3.2<sup>[27]</sup>; $\sigma_d$ 为日行使里程 的标准差,这里取 0.88<sup>[27]</sup>。

3) EV 单次充电时间 T<sub>c</sub>

假设 EV 充电为慢充方式,根据日行驶里程可 知每辆 EV 单次充电时间的概率密度为

$$f(T_{\rm c}) = \int_{3}^{4} \frac{1}{T_{\rm c}\sqrt{2\pi}\sigma_{\rm d}} \exp\left(\frac{\ln\frac{T_{\rm c}P_{\rm c}}{0.242} - \mu_{\rm d}}{-2\sigma_{\rm d}^{2}}\right) \mathrm{d}P_{\rm c}$$
(19)

式中,P。为 EV 慢充充电功率,其值为 3~4 kW。

4) EV 期望荷电状态  $S_{e}$ 

假设 EV 接入充电桩的时刻为  $T_{on}$ ,初始 EV 电 池荷电状态  $S_s$ 服从 $\mu \ \sigma$ 分别为 0.5 和 0.1 的正态 分布,则可以计算其离网时的荷电状态  $S_s$ 为

$$S_{\rm e} = S_{\rm s} + \frac{\eta \times P_{\rm c} \times T_{\rm on}}{E}$$
(20)

式中:E为 EV 电池的额定容量; $\eta$ 为 EV 充电效率。

综上,EV 在各时段处于充电状态的概率计算公 式为

$$P(\theta_{t_0} = 1) = 1 - F_{\text{STc}}(t_{\text{arr}} > t_0, t_{\text{arr}} + T_c \le t_0 + 24) - F_{\text{STc}}(t_{\text{arr}} + T_c \le t_0)$$
(21)

式中: $\theta_{t_0}$ 为 EV 在  $t_0$ 时刻的充电状态, $\theta_{t_0} = 1$  表示处 于充电状态;  $F_{STe}$  为非充电状态的概率分布函数,由 于  $t_{arr}$ 和  $T_e$ 相互独立分布,则  $F_{STe} = F_S F_{Te}$ , $F_S$  为充电 起始时刻的概率分布函数, $F_{Te}$ 为充电时长的概率分 布函数。

# 2.2 系统运行灵活性需求模型

系统运行灵活性需求分为上行灵活性需求和下

行灵活性需求,考虑了单位时间净负荷波动和预测 误差所引起的安全裕度。系统运行灵活性需求的情况如图2所示。



图中: $P_{NL,i}$ 为 t 时刻的净负荷; $P_{NL,i+1}$ 为 t+1 时 刻的净负荷; $u_{i+1}$ 、 $d_{i+1}$ 分别为 t+1 时刻系统所需的上 行、下行灵活性。由图 2(a)可知,当净负荷增大的 时候,若  $d_{i+1} < P_{NL,i}$ ,则可以用  $F_i^u = u_{i+1} - P_{NL,i}$ 表示系 统上行灵活性需求,用  $F_i^d = P_{NL,i} - d_{i+1}$ 表示系统下行 灵活性需求;如果  $d_{i+1} > P_{NL,i}$ ,则系统没有下行灵活性 需求( $F_i^d = 0$ )。由图 2(b)可知,当净负荷减小的时 候,如果  $u_{i+1} > P_{NL,i}$ ,则可以用  $F_i^u = u_{i+1} - P_{NL,i}$ 表示系 统上行灵活性需求,用  $F_i^d = P_{NL,i} - u_{i+1}$ 表示系统下行 灵活性需求;如果  $u_{i+1} \le P_{NL,i}$ ,则系统没有上行灵活 性需求( $F_i^u = 0$ )。计算式为

$$\begin{cases} F_{\iota}^{u} = F_{M,\iota}^{u} + P_{L,\iota+1}^{n} - P_{L,\iota}^{n} \\ F_{\iota}^{d} = F_{M,\iota}^{d} + P_{L,\iota}^{n} - P_{L,\iota+1}^{n} \end{cases}$$
(22)

式中: $F_{\iota}^{u}$ 、 $F_{\iota}^{d}$ 分别为系统的上行、下行灵活性需求;  $F_{M,\iota}^{u}$ 、 $F_{M,\iota}^{d}$ 分别为系统的上行、下行灵活性; $F_{L,\iota}^{n}$ 、 $P_{L,\iota+1}^{n}$ 分别为系统在 t 时刻和 t+1 时刻的净负荷。

### 2.3 系统供给灵活性模型

新型电力系统中源荷两端都具有较高不确定 性,通过可调度资源可以对其进行调节,这些可调度 资源为系统灵活性资源。而预留灵活性资源以调节 净负荷的波动能够提高系统运行灵活性。所考虑的 灵活性资源有:储能系统(energy storage system, ESS)、上级电网购电、微型燃气轮机(microturbine, MT)及 EV。

1)ESS 灵活性供应

电力系统中储能具有快速响应的能力,但其灵活 性供应能力仍然受制于自身容量和荷电状态的约束。  $\begin{cases} F^{u}_{\text{ESS},n_{e}}(t,\tau) = \min[P^{\max}_{\text{dis},n_{e}}, E_{\text{ESS},n_{e}}\eta_{\text{ESS},n_{e}}(S_{n_{e},t} - S^{\min}_{n_{e}})/\tau] \\ F^{d}_{\text{ESS},n_{e}}(t,\tau) = \min[P^{\max}_{\text{ch},n_{e}}, E_{\text{ESS},n_{e}}(S^{\max}_{n_{e}} - S_{n_{e},t})/\tau\eta_{\text{ESS},n_{e}}] \end{cases}$ (23)

式中: $\tau$ 为时间尺度,这里取1h; $F^{u}_{ESS,n_{e}}(t,\tau)$ 、

 $F_{\text{ESS},n_e}^{\text{d}}(t,\tau)$ 分别为t时刻第 $n_e$ 组 ESS 上调、下调灵 活性裕度; $P_{\text{dis},n_e}^{\text{max}}$ 分别为第 $n_e$ 组 ESS 最大放 电、充电功率; $E_{\text{ESS},n_e}$ 为第 $n_e$ 组 ESS 额定容量;  $\eta_{\text{ESS},n_e}$ 为第 $n_e$ 组 ESS 充放电效率; $S_{n_e,t}$ 为t时刻第 $n_e$ 组 ESS 荷电状态; $S_{n_e}^{\text{max}}$ 、 $S_{n_e}^{\text{min}}$ 分别为第 $n_e$ 组 ESS 荷电 状态的最大值、最小值。

2)上级电网灵活性供应

变压器和输电线路承载能力决定了上级电网提供的灵活性裕度,配电网通过与上级电网连接的变 压器进行交互。配电变压器关口的功率约束为

$$\begin{cases} 0 \leqslant F_{\text{NET}}^{u}(t,\tau) \leqslant P_{\text{NET},t}^{\text{max}} \\ P_{\text{NET},t}^{\text{min}} \leqslant F_{\text{NET}}^{\text{d}}(t,\tau) \leqslant 0 \end{cases}$$
(24)

式中:  $F_{\text{NET}}^{u}(t,\tau)$ 、 $F_{\text{NET}}^{d}(t,\tau)$ 分别为 t 时刻上级电网向上、向下灵活性裕度;  $P_{\text{NET},\tau}^{\text{max}}$  分别为配电变 压器关口在 t 时刻最大正向、反向传输功率。

3) MT 灵活性供应

电力系统 MT 中的灵活性供应能力主要由两点 约束而定:爬坡率与额定发电量。

$$\begin{cases} F_{MT,n_{M}}^{u}(t,\tau) = \min(v_{MT,n_{M}}^{u}\tau, P_{MT,n_{M}}^{max} - P_{MT,n_{M,t}}) \\ F_{MT,n_{M}}^{d}(t,\tau) = \min(v_{MT,n_{M}}^{d}\tau, P_{MT,n_{M,t}} - P_{MT,n_{M}}^{min}) \end{cases}$$
(25)

式中: $F_{MT,n_M}^u(t,\tau)$ 、 $F_{MT,n_M}^d(t,\tau)$ 分别为第 $n_M$ 台 MT 在t时刻上行、下行裕度; $v_{MT,n_M}^u$ 、 $v_{MT,n_M}^d$ 分别为 MT 上行、 下行灵活性爬坡率; $P_{MT,n_M}$ 、为第 $n_M$ 台 MT 在t 时 刻出力; $P_{MT,n_M}^{max}$ 、 $P_{MT,n_M}^{min}$ 分别为第 $n_M$ 台 MT 出力的最大 值、最小值。

4) EV 灵活性供应

EV 可以为系统提供灵活性供应,但受到充放电效率、荷电状态和车主充电计划的限制。

$$\begin{cases} F_{n_{\rm V}}^{\rm EV,u}(t,\tau) = \min(P_{\rm dis,n_{\rm V}}^{\rm EV,max}, E_{n_{\rm V}}^{\rm EV}\eta_{n_{\rm V}}^{\rm EV}(S_{\rm EV,n_{\rm V},t} - S_{\rm EV,n_{\rm V}}^{\rm min})/\tau) \\ F_{n_{\rm V}}^{\rm EV,d}(t,\tau) = \min(P_{\rm ch,n_{\rm V}}^{\rm EV,max}, E_{n_{\rm V}}^{\rm EV}(S_{\rm EV,n_{\rm V}}^{\rm max} - S_{\rm EV,n_{\rm V},t})/\tau\eta_{n_{\rm V}}^{\rm EV}) \end{cases}$$

$$(26)$$

式中: $F_{n_{V}}^{EV,u}(t,\tau)$ 、 $F_{n_{V}}^{EV,d}(t,\tau)$ 分别为 t 时刻第  $n_{V}$ 组 EV 上调、下调灵活性裕度; $P_{dis,n_{V}}^{EV,max}$ 分别为第  $n_{V}$ 组 EV 最大放电、充电功率; $E_{n_{V}}^{EV}$ 为第  $n_{V}$ 组 EV 额 定容量; $\eta_{n_{V}}^{EV}$ 为第  $n_{V}$ 组 EV 充放电效率; $S_{EV,n_{V}}^{max}$ 、 $S_{EV,n_{V}}$ 、 $S_{EV,n_{V}}$ 分别为第  $n_{V}$ 组 EV 最大、最小及 t 时刻的荷电 状态。

# 2.4 主动配电网运行灵活性指标模型

为了评价高渗透可再生能源配电网的灵活性, 引入了灵活性裕度作为评价指标。

$$f_{u} = \sum_{t} \mu_{\text{FLEX},t} \left[ \sum_{n_{\text{M}}} F_{\text{MT},n_{\text{M}}}^{u}(t,\tau) + \sum_{n_{\text{e}}} F_{\text{ESS},n_{\text{e}}}^{u}(t,\tau) + F_{\text{NET}}^{u}(t,\tau) + \sum_{n_{\text{V}}} F_{n_{\text{V}}}^{\text{EV},u}(t,\tau) - F^{u}(t,\tau) \right]$$
(27)

$$f_{d} = \sum_{t} (1 - \mu_{FLEX,t}) \cdot \left[ \sum_{n_{M}} F_{MT,n_{M}}^{d}(t,\tau) + \sum_{n_{e}} F_{ESS,n_{e}}^{d}(t,\tau) + F_{NET}^{d}(t,\tau) + \sum_{n_{V}} F_{n_{V}}^{EV,d}(t,\tau) - F^{d}(t,\tau) \right]$$
(28)

式中: $\mu_{FLES,t}$ 为t时刻系统灵活性需求状态变量,用 1和0分别表示向上、向下灵活性需求; $f_u$ 、 $f_d$ 分别为 主动配电网向上、向下灵活性裕度; $F^u(t,\tau)$ 、 $F^d(t,\tau)$ 分别为向上、向下灵活性需求总和。

# 3 考虑运行灵活性的主动配电网区间 多目标调度模型

计及 MT、ESS、上级电网和 EV 集群共 4 种灵活 性调度资源,构建系统运行费用最小和灵活性最大 的 ADN 多目标区间优化调度模型。

#### 3.1 目标函数

1)目标函数1:系统运行费用f1最小

主动配电网运行费用包括系统购电、系统网损、 储能费用,构建的目标函数为

$$\min \hat{f}_{1} = \sum_{t} C_{t}^{g} \hat{P}_{t}^{g} + \sum_{t} C_{t}^{g} \hat{P}_{t}^{\log s} + \sum_{t} \sum_{n_{e}} L_{n_{e}}^{\exp} \hat{P}_{t,n_{e}}^{ess} + \sum_{t} \sum_{n_{w}} L_{n_{w}}^{w} \hat{P}_{t,n_{w}}^{w} + \sum_{t} \sum_{n_{p}} L_{n_{p}}^{pv} \hat{P}_{t,n_{p}}^{pv}$$
(29)

式中: $C_{t}^{e}$ 和 $P_{t}^{e}$ 分别为t时刻配电网向上级电网购电 价格、购电量; $\hat{P}_{t}^{\text{loss}}$ 为有功功率网损; $L_{n_{e}}^{\text{ess}}$ 、 $L_{n_{w}}^{w}$ 、 $L_{n_{p}}^{\text{pv}}$ 分 别为第 $n_{e}$ 台 ESS、第 $n_{w}$ 台风电机组、第 $n_{p}$ 台光伏机 组的平准化度电成本; $\hat{P}_{t,n_{e}}^{\text{ess}}$ 、 $\hat{P}_{t,n_{w}}^{v}$ 、 $\hat{P}_{t,n_{p}}^{\text{pv}}$ 分别为t时段 第 $n_{e}$ 台 ESS、第 $n_{w}$ 台风电机组、第 $n_{p}$ 台光伏机组功 率仿射值。

2) 目标函数 2: 负荷波动 f2 最小

最小化负荷波动以提高系统运行的稳定性,目 标函数为

$$\min \hat{f}_2 = \sum_{t} |P_t^{\text{load}} - P_{\text{av}}|$$
(30)

式中:  $P_t^{\text{load}}$  为配电网在 t 时段的总负荷;  $P_{av}$  为配电 网调度周期内负荷平均值。

3)目标函数3:灵活性裕度f,最大

为提高运行稳定性,以系统运行灵活性裕度最 大作为目标,函数为

$$\max \hat{f}_{3} = \sum_{l} \sqrt{f_{u}^{2} + f_{d}^{2}}$$
 (31)

3.2 约束条件

1)系统有功功率约束

$$\hat{P}_{t}^{g} + \hat{P}_{t}^{MT} + \sum_{n_{w}} \hat{P}_{t,n_{w}}^{w} + \sum_{n_{p}} \hat{P}_{t,n_{p}}^{pv} + \sum_{n_{e}} \hat{P}_{t,n_{e}}^{ch} - \sum_{i} r_{i}^{L} w_{t,i}^{L} - \sum_{n_{e}} \hat{P}_{t,n_{e}}^{dis} = \sum_{i} \hat{P}_{t,i}^{L} + \hat{P}_{t}^{EV}$$
(32)

式中:  $\hat{P}_{t}^{\text{MT}}$  为 t 时段 MT 发电量仿射值;  $\hat{P}_{t,n_{e}}^{\text{ch}}$ 、 $\hat{P}_{t,n_{e}}^{\text{dis}}$ 分 别为第  $n_{e}$ 台 ESS 在 t 时段的充电负荷和放电负荷;  $\hat{P}_{t}^{\text{EV}}$  为 t 时段 EV 充电功率;  $r_{i}^{\text{L}}$  为 i 支路阻抗值;  $w_{t,i}^{\text{L}}$ 为 t 时段流过 i 支路的电流平方。

2) ESS 充放电功率及荷电状态约束

$$\begin{cases} \hat{S}_{\text{OC},n_{e},t} = \hat{S}_{\text{OC},n_{e},t-1} + (\eta_{\text{ESS},n_{e}}\hat{P}_{t,n_{e}}^{\text{ch}} - \hat{P}_{t,n_{e}}^{\text{dis}} / \eta_{\text{ESS},n_{e}})\tau \\ S_{\text{OC},n_{e}}^{\min} < \hat{S}_{\text{OC},n_{e},t} \leq S_{\text{OC},n_{e}}^{\max} \end{cases}$$
(33)

式中, $\hat{S}_{OC,n_e,t}$ 、 $S_{OC,n_e}^{max}$ 、 $S_{OC,n_e}^{min}$ 分别为第 $n_e$ 台 ESS 在t时 刻荷电状态及其荷电状态的上、下限。

3)节点电压幅值约束

$$U_{\min,g} \leq U_{\iota,g} \leq U_{\max,g} \tag{34}$$

式中: $\hat{U}_{t,g}$ 为节点 g 在 t 时刻的电压值; $U_{\min,g}$ 为节点 g 的电压下限; $U_{\max,g}$ 为节点 g 的电压下限; $U_{\max,g}$ 为节点 g 的电压上限。

4) EV 集群的充电功率约束

设  $\hat{P}_{\iota}^{\text{EV}}$  为 t 时刻接入配电网的 EV 充电负荷,其 约束条件为

 $\mu_{\iota}^{\text{EV}} - 3\sigma_{\iota}^{\text{EV}} \leq \hat{P}_{\iota}^{\text{EV}} \leq \mu_{\iota}^{\text{EV}} + 3\sigma_{\iota}^{\text{EV}}$ (35) 式中,  $\mu_{\iota}^{\text{EV}} \langle \sigma_{\iota}^{\text{EV}} \rangle \beta \rangle t$  时刻 EV 充电负荷的期望值 和标准差。

# 4 基于空间近似法的主动配电网多目 标区间优化调度求解

采用粒子群优化(particle swarm optimization, PSO)算法求解所提考虑源荷不确定性的 ADN 区间 优化调度模型,并引入 D-S(Dempster-Shafer)证据理 论计算各粒子的适应度;此外,所提出的基于空间近 似法的仿射潮流计算用于获得更紧凑的潮流区间结 果。解决方案步骤为:

1) 输入预测得到的 WT 和 PV 出力间隔值, 以 及系统的基本参数;

2) 设置粒子群计算的参数信息, 初始化设置迭 代次数  $G_{en} = 1$ ;

3) 通过基于空间近似法的改进仿射算法 (improved affine arithmetic, IAA)进行潮流计算,并 通过 D-S 证据理论计算初始粒子的适应度值;

4)更新每个粒子的速度和位置;

5)基于 IAA 的区间潮流计算,利用改变的节点 数据进行潮流计算;

6)判断系统状态量是否满足约束条件。是,则进行下一步;否,则返回步骤4;

7) 计算每个粒子的适应度值和个体的历史最 佳位置;

8) 计算种群的最优适应度值和种群的历史最优位置;

9) 返回步骤 4, 直到满足 Gen > Gen max;

10)计算评估指标和输出结果。

# 5 算例仿真

以改进的 IEEE 33 节点系统进行仿真,其包含 2 个 500 kW 的小型风力发电厂,分别接在节点 16 和 30,以及 2 个 600 kW 的小型光伏发电厂,分别接在 节点 12 和 27;3 个 ESS 配置均为 200 kW/800 kWh; 1 个 EV 充电站接在节点 22 处。ADN、ESS 和分 布式 RES 的爬坡率上限分别设置为 1000 kW/h、 200 kW/h 和 200 kW/h;ESS 荷电状态上、下限分别 为 0.9、0.3;可控负荷出力上、下限分别为 250 kW、 100 kW。系统结构如图 3 所示。



基于风电和光伏历史数据,采用灰色神经网络<sup>[28]</sup>预测得到次日风电和光伏的出力值,将多次预测值合并即得到了 WT 和 PV 的出力区间值,其结果如图 4 所示。



图 4 WT 和 PV 出力功率区间值

5.1 各方案对比分析

为了对比分析单独考虑经济成本和运行灵活性 与综合考虑二者构建多目标的区别,分别构建了3 种方案。

方案1:仅考虑运行经济性和负荷波动;

方案2:仅考虑运行灵活性裕度;

方案 3:同时考虑运行经济性、负荷波动和灵活 性裕度。

3种方案的优化调度区间结果如表1所示。

场景	运行成本/元	向上灵活性 裕度/kW	向下灵活性 裕度/kW
方案 1	[76 079.65,	[23 006.86,	[7 871.11,
	77 734.45]	23 777.16]	13 487.35]
方案 2	[ 82 253.73,	[ 27 746.58,	[23 570.65,
	83 436.06 ]	28 770.91 ]	24 218.72]
方案 3	[78 000.56,	[24 811.17,	[15 853.23,
	78 441.39]	24 834.41]	15 935.58]

表1 各方案结果对比

从表1可以看出:方案1只考虑经济性和负荷 波动,在3个方案中运行成本相对最低,但同时其灵 活性裕度也是3个方案中最低的,特别是向下灵活 性裕度相较于其他两个方案低了50%以上;方案2 仅考虑系统运行灵活性裕度最大,所得调度结果中 系统灵活性裕度获得了较大的提升,但同时增大了 系统的运行成本;方案3同时考虑了运行成本、负荷 波动和运行灵活性裕度构建多目标优化调度,在牺 牲了一定运行成本的基础上,使系统灵活性裕度有 了较好的提升。方案3相较于方案2而言成本较 低,在系统运行灵活性裕度上相较于方案1也有了 较好的提升。

# 5.2 优化结果及分析

根据所构建的多目标区间优化调度模型,考虑

了 ADN 的运行成本、负荷波动和运行灵活性。采用 第4章中提出的求解方法对模型进行求解,得到如 图5和图6所示的各灵活性资源功率区间值。为了 更加直观地展示优化后的调度结果,将区间调度结 果分成区间上界和区间下界两部分,两者结合可以 反映调度的整体区间情况。



图 5 各灵活性资源功率区间值下界



图 6 各灵活性资源功率区间值上界

在图 5 与图 6 中,功率值为负表示其为用电负 荷,功率值为正表示其为放电电源。由图可以看出, 在 5:00—13:00 时段内,由于负荷较少,可再生能源 出力较大,此时 ESS1、ESS2 处于充电状态储存电 能;相反在 18:00—21:00 时段,ESS1、ESS2、ESS3 处 于放电状态,以弥补该时段负荷高峰带来的供电不 足。为避免大规模 EV 充电造成负荷"峰上加峰"的 情况出现,优化调度后的 EV 充电负荷集中于夜晚 23:00—24:00 时段及次日凌晨至 5:00 时段,部分 EV 充电负荷分布于 16:00—17:00 时段和 20:00— 21:00 时段。总体来说,优化调度后的配电网负荷 波动较小,大规模 EV 调度后实现了削峰填谷的效 果,使得整个主动配电网系统充分消纳可再生能源 的同时整体负荷波动较小。

#### 5.3 系统运行灵活性分析

图 7 为基于所提的灵活性区间优化调度方法得 到的 ADN 系统运行灵活性裕度和净负荷波动范围 示意图。系统净负荷波动是由负荷波动以及可再生 能源出力波动造成,而系统运行灵活性裕度由 MT、 ESS、上级电网购电和接入电网的 EV 提供。

由图 7 可以看出,系统净负荷波动范围始终位 于运行灵活性裕度范围以内,并留有一定的上、下调 节区间,说明系统具有良好的灵活性,能够应对可再 生能源的不确定性扰动,同时还具有一定的裕度 以应对其他的不确定性扰动。系统净负荷波动在 1:00—7:00 时段和 10:00—18:00 时段波动相对较 大,是由于风电和光伏在这两个时段的出力波动相 对较大造成的。相对应的系统运行灵活性裕度在 1:00—7:00 时段上调裕度较大,是由于该时段负荷 较小,MT、ESS 和上级电网等灵活性资源可以提供 更多的灵活性供应。



#### 5.4 结果保守性对比分析

所提出的基于空间近似法的 IAA 使得仿射非 线性运算过程中产生保守性更低的结果,而将基于 空间近似法的 IAA 引入主动配电网区间潮流计算 中,使得主动配电网潮流计算区间结果值保守性更 小,更不容易越限,进而获得更佳的调度结果和系统 状态结果。为了验证所提方法的有效性和优越性, 将所提基于空间近似法的仿射潮流计算与传统仿射 潮流计算<sup>[8]</sup>和 MC 模拟法得到的配电网潮流计算结 果进行对比分析。所得到的 12:00 时刻配电网节点 电压幅值和相角如图 8、图 9 所示。

由上述潮流计算结果可以得出:

1)采用传统仿射算法和 IAA 进行潮流计算得 到的电压幅值和相角区间都严格大于 MC 模拟法得 到的区间,表明所提出的 IAA 算法可严格获得潮流 计算解集的上、下边界包络线,验证了所提的基于空 间近似法的配电网潮流计算的有效性。

2)所提出的 IAA 得到的区间结果相比传统仿 射算法得到的区间结果更窄,更靠近 MC 模拟法的 仿真结果。因此,所提方法得到的区间结果具有更 低的保守性而更为准确,验证了所提方法的优越性。



图 9 12:00 时节点电压相角结果对比

# 6 结 论

上面提出了一种基于空间近似的主动配电网灵 活性区间优化调度方法,并分析和验证了所提方法 的有效性。所得结论主要如下:

 1)将仿射计算方法引入空间近似逼近的思想, 使得仿射非线性运算更为精确快速,降低了仿射非 线性运算过程中保守性扩张的问题,使得区间潮流 计算结果更接近实际值。 2)构建了主动配电网灵活性需求模型以及主动配电网中多灵活性资源的灵活性供应模型,将灵活性指标引入主动配电网优化调度中,既保证了经济性又提高了主动配电网运行灵活性。

### 参考文献

- [1] 高志远,张晶,庄卫金,等.关于新型电力系统部分特点的思考[J].电力自动化设备,2023,43(6):137-143.
- [2] 陈国平,董昱,梁志峰.能源转型中的中国特色新能源
   高质量发展分析与思考[J].中国电机工程学报,2020,
   40(17):5493-5506.
- [3] 廖小兵,刘开培,乐健,等.电力系统区间潮流计算方法 综述[J].中国电机工程学报,2019,39(2):447-458.
- [4] 李卓然.考虑不确定预算的区域电热综合能源系统区 间潮流计算方法研究[D].杭州:浙江大学,2021.
- [5] 宋佳磊,盛东,谢赢朋,等.基于特征融合的多环复 杂电网区间的潮流计算方法[J].电气应用,2022, 41(9):64-70.
- [6] VACCARO A, CANIZARES C A, VILLACCI D. An affine arithmetic-based methodology for reliable power flow analysis in the presence of data uncertainty[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2010, 25(2):624-632.
- [7] 王守相,武志峰,王成山.计及不确定性的电力系统 直流潮流的区间算法[J].电力系统自动化,2007, 31(5):18-22.
- [8] 程杉,杨堃,汪业乔,等.含风力发电的电动汽车充电站区 间优化调度[J].电机与控制学报,2021,25(6):101-109.
- [9] 韩帅,孙乐平,卢健斌,等.含电动汽车的气电互联虚拟
   电厂区间多目标优化调度策略[J].储能科学与技术,
   2022,11(5):1428-1436.
- [10] 胡荷娟,孙晓燕,曾博,等.考虑源-荷不确定性的矿山 综合能源系统多时间尺度区间优化调度[J].控制与 决策,2024,39(3):827-835.
- [11] GU W, LUO L Z, DING T, et al. An affine arithmeticbased algorithm for radial distribution system power flow with uncertainties [J]. International Journal of Electrical Power and Energy Systems, 2014, 58:242-245.
- [12] 王守相, 韩亮. DG 出力不确定性对配电网影响力分析的复仿射数学方法[J].中国电机工程学报,2014, 34(31):5507-5515.
- [13] 孙瑞一,张岩.位宽优化中乘法运算的一种自动范围分析方法[J].哈尔滨工业大学学报,2014,46(3):43-48.
- [14] ADUSUMILII B S, KUMAR B K. Backward/forward

sweep-based power flow analysis of distribution systems under uncertainty using new affine arithmetic division [C]//2020 IEEE Power & Energy Society Innovative Smart Grid Technologies Conference (ISGT), February 17–20,2020, Washington, DC, USA. IEEE, 2020:1–5.

- [15] 程杉,左先旺,杨堃,等.基于改进仿射算法的主动
   配电网区间调度[J].电力自动化设备,2024,44(1):
   40-48.
- BÄRENFÄNGER R, DRAYER E, DANILUK D, et al. Classifying flexibility types in smart electric distribution grids: A taxonomy [C]//CIRED Workshop 2016, June 14-15,2016, Helsinki. IET, 2016:1-4.
- BIEGEL B, ANDERSEN P, STOUSTRUP J, et al. The value of flexibility in the distribution grid [C]//IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Europe, October 12–15, 2014, Istanbul, Turkey. IEEE, 2015:1–6.
- [18] 鲁宗相,李海波,乔颖.高比例可再生能源并网的电 力系统灵活性评价与平衡机理[J].中国电机工程学 报,2017,37(1):9-20.
- [19] 陈建凯.含分布式电源配电网灵活性优化提升方 法[D].天津:天津大学,2020.
- [20] 杨运国,侯健生,边晓燕,等.面向高比例新能源配电
   网的灵活性资源综合评价[J].供用电,2021,38(11):
   68-76.
- [21] 马汝祥,姚康宁,邵林,等.考虑场景聚类的配电网 运行灵活性评价[J].电力需求侧管理,2021,23(3): 86-91.
- [22] CAPASSO A, FALVO M C, LAMEDICA R, et al. A new methodology for power systems flexibility evaluation [C]//2005 IEEE Russia Power Tech, June 27–30, 2005, St. Petersburg, Russia. IEEE, 2005:1–6.
- [23] MA J, SILVA V, BELHOMME R, et al. Evaluating and planning flexibility in sustainable power systems [J].
   IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2013, 4(1): 200-209.
- [24] 李海波, 鲁宗相, 乔颖, 等. 大规模风电并网的电力
   系统运行灵活性评估[J].电网技术, 2015, 39(6):
   1672-1678.
- [25] 史喆,梁毅,李华,等.计及灵活性多目标电-热-交 通综合能源系统区间优化运行[J].电力系统保护与 控制,2022,50(21):33-42.
- [26] 唐君毅,丁碧薇,杨琪.考虑风电预测区间的电力系统灵活性评估方法[J].电气传动,2023,53(7):49-55.

(下转第69页)

- PENG F Z, LAI J S, MCKEEVER J, et al. A multilevel voltage-source converter system with balanced DC voltages[C]//Proceedings of PESC'95-Power Electronics Specialist Conference, June 18-22, 1995, Atlanda, USA. IEEE, 1995, 2:1144-1150.
- [4] MEYNARD T A, FOCH H, THOMAS P, et al. Multicell converters: Basic concepts and industry applications [J].
   IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2002, 49(5):955-964.
- [5] DEBNATH S, QIN J C, BAHRANI B, et al. Operation, control, and applications of the modular multilevel converter: A review [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2015, 30(1):37-53.
- [6] 周彬,徐靖楠,郭旋.一种模块化多电平电力电子变 压器及其控制策略研究[J].电器与能效管理技术, 2020(1):71-77.
- [7] RUAN X B, LI B, CHEN Q H, et al. Fundamental considerations of three-level DC-DC converters: Topologies, analyses, and control[J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems, 2008, 55(11):3733-3743.
- [8] YAN X X, SECKOLD A, PATTERSON D. Development of a zero-voltage-transition bidirectional DC-DC converter for a brushless DC machine EV propulsion system [C]// 2002 IEEE 33rd Annual IEEE Power Electronics Specialists Conference (PESC), June 23-27, 2002, Cairns, QLD, Australia. IEEE, 2002: 1661-1666.
- [9] CHUNG S H, CHEUNG W L, TANG K S. A ZCS bidirectional flyback DC/DC converter [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2004, 19(6): 1426-1434.
- [10] KASHIF M. Bidirectional flyback DC-DC converter for hybrid electric vehicle: Utility, working and PSPICE computer model[C]// 2012 Asia Pacific Conference on Postgraduate Research in Microelectronics and Electronics, December 5-7, 2012, Hyderabad, India. IEEE, 2012: 61-66.

(上接第54页)

- [27] 李扬,韦钢,马钰,等.含电动汽车和分布式电源的主动 配电网动态重构[J].电力系统自动化,2018,42(5): 102-110.
- [28] 王守相,张娜.基于灰色神经网络组合模型的光伏短期 出力预测[J].电力系统自动化,2012,36(19):37-41.

- [11] DEEPA K, MHAH L R, YUVASRI, et al. Bi-directional push-pull converter fed four quadrant DC drive [C]//2013 International Conference on Emerging Trends in Communication, Control, Signal Processing and Computing Applications (C2SPCA), October 10 11, 2013, Boungalore, India. IEEE, 2013;1–6.
- [12] MURTHY-BELLUR D, KAXIMIERCZUK M K. Isolated two-transistor Zeta converter with teduced transistor voltage stress [ J ]. IEEE Transactions on Circuits and Systems II: Express Briefs, 2011, 58(1):41-45.
- [13] 关维德,李涛,钟健,等.电机控制器直流侧前置双 有源桥 DC-DC 变换器的模型预测与应力优化混合 控制[J].电工技术学报,2024,39(12):3787-3801.
- [14] 丁江萍,高晨祥,许建中,等.级联H桥型电力电子变
   压器的电磁暂态等效建模方法[J].中国电机工程学
   报,2020,40(21):7047-7056.
- [15] RAY B. Bidirectional DC/DC power conversion using constant-frequency quasi-resonant topology [C]//1993
   IEEE International Symposium on Circuits and Systems, May 3-6, 1993, Chicago, USA. IEEE, 1993:2347-2350.
- [16] 李福,邓红雷,张国驹,等.一种中间电容谐振型级
   联双向 DC-DC 变换器[J].电工技术学报,2022, 37(20):5253-5266.
- [17] SANCHEZ-SANCHEZ E, PRIETO-ARAUJO E, JUNYENT-FERRE A, et al. Analysis of MMC energybased control structures for VSC-HVDC links[J]. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, 2018, 6(3):1065-1076.
- [18] 杨舒婷,陈新,黄通,等.考虑 MMC 环流控制的海上
   风电经柔直送出系统阻抗塑造方法[J].中国电力,
   2023,56(4):38-45.

作者简介:

陈仁钊(1970),男,硕士,高级工程师,从事智能微电网 分布式能源、储能电池及电池管理系统研究。

(收稿日期:2024-04-25)

作者简介:

张胜飞(1983),男,高级工程师,从事电力系统规划研究、输变电设计及其管理工作;

刘 毅(1985),男,硕士,高级工程师,从事电力系统规 划研究、输变电设计及其管理工作。

(收稿日期:2024-05-10)