

[文章编号] 1003—4684(2022)02-0037-07

基于仿射区间潮流算法的电网消纳指标研究

王艳阳¹, 童华敏¹, 刘子旻², 李黄强¹, 韩 露¹, 朱 江¹

(1 国网湖北省电力有限公司宜昌供电公司, 湖北 宜昌 443200;

2 湖北工业大学电气与电子工程学院, 湖北 武汉 430068)

[摘 要] 针对新能源发电机组较多的区域电网在外送通道关闭的情况下易出现新能源消纳问题, 提出一套基于仿射型区间潮流算法的电网新能源消纳指标, 首先将区域电网发电侧, 负荷侧转换为数学模型, 发电侧结合仿射型区间潮流算法预测区域新能源出力上下限区间, 引入“区域电网新能源密度 τ_i ”, “区域电网新能源消纳水平 $\bar{\xi}$ ”, “区域电网新能源越界时间 T ”。预测区域电网新能源消纳能力不足的容量及概率, 并研究抽水蓄能调度缓解电网消纳压力的可行性。将水电站运行方式改为抽水蓄能后其问题得到明显缓解。仿射区间潮流算法对电网消纳指标的分析可为电网提供直观参考及调度策略。

[关键词] 仿射算法; 新能源消纳; 电网运行; 区间潮流

[中图分类号] TM712 [文献标识码] A

电网新能源的大量注入在负荷较低时段会产生新能源消纳能力不足的问题, 造成弃风, 弃光的问题。提前对新能源出力进行预测可使电网对新能源消纳问题做提前规划, 有效缓解弃风弃光问题。

电力系统分析的随机潮流算法主要分三类: 概率潮流, 模糊潮流, 区间潮流。区间潮流将变量以区间形式表示, 在三种随机潮流中建模最为简便, 只需获得变量的上下界及约束条件。仿射型区间潮流计算可以解决各个变量之间的耦合性及相关性, 能降低区间潮流中区间过大的问题。仿射运算的保守性增大主要来源于仿射中的非线性运算, 文献[1]中比较了两种非线性仿射近似运算的保守性, 并提出了预测—矫正迭代思想, 在减小保守性的同时保证完备性。文献[2]中建立了含风电厂区间的潮流模型, 分析了风电出力的区间相关性, 提出了耦合仿射变换约束的最优场景法。文献[3]指出仿射算法可在区间收敛的前提下很好地抑制区间算数对加法, 减法的扩张。文献[4]通过混合潮流进行了各种潮流算法在随机潮流中的比较。文献[5]在交直流混合电网中进行了区间潮流的研究仿真。文献[6]、[7]以微电网为研究对象, 应用区间潮流解决微电网中新能源不确定性强的问题^[1-10]。电网新能源发电注入电网的功率具有很强的波动性及不确定性, 在负荷较低的情况下, 新能源的消纳将成为一大难题,

若能通过不确定潮流算法对新能源出力进行预测, 可为电网调度提供一定参考。

区域电网电能无法外送时, 区域内电网在不同场景下新能源消纳能力及电网状况分析, 本文: 1) 将电网分为发电侧及负荷侧两部分, 基于 IEEE39 标准节点配电网在 MATLAB 中建立电网新能源消纳模型。将针对某地区电网中接入的风、光、水等新能源建模, 在 IEEE39 节点配电网中设置连接发电机组的节点, 完成电网发电侧模型的建立。建立四种不同发电机组的出力数学模型。根据不同时段的阳光光照强度, 地区风速, 水流量大小粗略预估出不同种类发电机组的运行状况及出力的有功功率区间。2) 引入仿射型区间潮流算法。使用区间潮流计算中的 Krawczyk-Moore 算法减小高次噪声元造成的误差, 减少区间保守性。3) 根据地区区域电网的往年负荷状况, 粗略预测今年的年负荷曲线, 再将系统运行分为大、小方式两种场景分类仿真。4) 通过仿射型区间潮流算法计算出各节点的电压, 电流, 注入的有功功率区间, 通过潮流计算结果绘制区域电网出力曲线及负荷曲线。

1 区域电网风—光—水发电机组建模

1.1 水电出力建模

影响水电出力的主要因素是其所在位置水资源

[收稿日期] 2021—10—27

[基金项目] 国网宜昌供电公司(SGHBVCOODKJS2100849)

[第一作者] 王艳阳(1980—), 男, 湖北秭归人, 研究方向为电力系统安全稳定控制

[通信作者] 刘子旻(1998—), 男, 湖北武汉人, 湖北工业大学硕士研究生, 研究方向为电力系统运行与控制

的丰富程度,分为丰水期和枯水期。

水轮机转动部分机械特性为:

$$J \frac{d\omega}{dt} = M_t - M_g$$
$$M_t = \frac{\rho Q H \eta}{\omega}$$
$$P_r = \frac{M_r G D^2 n_r^2}{3580 J_{\omega r}} = \frac{G D^2 n_r^2}{3580 T_a}$$

其中 J 为水电机组的转动惯性矩, ω 为水轮机组的转动角速度, n 为机组转速, M_t 为水轮机转矩, M_g 为水轮机负载转矩, Q 为水轮机流量, H 为水轮机净水头, η 为水轮机的工作效率。

1.2 光伏出力建模

光伏发电受太阳辐射强度的影响,云层移动等多种复杂自然现象也会对光伏发电产生影响^[11]。为建立模型,简化复杂变量对光伏发电的影响,在不考虑温度对光伏太阳能板发电功率的影响的情况下,光伏电站的理论出力

$$P_t^s = P_n \frac{I_t^s}{I_n}$$

其中 P_t^s 为光伏电站在 t 时刻时的理论功率, P_n 是光伏电站额定光照强度下的额定功率, I_t^s 为 t 时刻实际光照强度, I_n 是额定光照强度, 且 $I_n = 1000 \text{ W/m}^2$ 。光伏电站的实际出力一般会小于理论出力,设置系数 k 表征光伏电站的出力衰减,其表达式为:

$$K = \frac{\int_t P_t^m dt}{\int_t P_t^s dt}$$

其中 P_t^s 为上式中光伏发电站在 t 时刻的理论功率, P_t^m 为光伏电站实测功率。光伏出力受太阳辐射随时间的变化及温度的影响。 ΔP_t 为光伏出力实际与理论值之差:

$$\Delta P_t = P_t^m - K P_t^s$$

1.3 风电出力建模

风电、光电有波动性和随机性,风电的出力受地方风资源与自然环境下风速的影响,风电厂出力达到装机容量 80% 以上的时间只有 2% 或更少。

某地区并网的大多数风电机组额定功率为 150 MW;风力发电厂在风速 3 m/s 以下时出力可视为 0,风速在 12 m/s 以上时风力发电机组可达到最大发电功率,风速超过 25 m/s 时风机运行存在安全隐患,应暂时关停^[12]。

风力发电机的发电功率与风速有较大关系,风力发电机的输出功率

$$P = \frac{1}{2} \rho S v^3 C(\epsilon, \eta) \tag{1}$$

其中 ρ 为空气密度, S 为风力发电机旋转叶片风力

作用面积, v 为风速, $C(\epsilon, \eta)$ 为风能利用率。此公式中不考虑温度对空气密度的影响,认为 $\rho_{\text{air}} = 1.293 \text{ kg/m}^3$ 。 ϵ 为叶尖速比,其与风速的关系如下:

$$\epsilon = R\omega/v \tag{2}$$

其中 R 为风机叶片半径, ω 为叶片旋转角速度, v 为风速。

1.4 新能源机组出力数学模型

$$P = n \frac{M_r G D^2 n_r^2}{3580 J_{\omega r}} + k P_n \frac{I_t^s}{I_n} + r \frac{1}{2} \rho S v^3 C(\epsilon, \eta)$$

结合上文各发电机组数学模型,区域电网的新能源机组出力表达式如上所示,结合气候概率模型可粗略预测区域电网的长期出力。

1.5 气候概率模型

为通过数学模型绘制区域电网出力曲线,在此引入气候概率模型,按季节分为春、夏、秋、冬,天气分为晴天、阴天、雨天,其气候概率见表 1。

表 1 不同气候概率

气候场景	气候概率			
	春	夏	秋	冬
晴天	0.158	0.128	0.171	0.157
阴天	0.060	0.108	0.054	0.066
雨天	0.025	0.018	0.030	0.025

2 仿射型区间潮流计算

2.1 仿射运算

仿射运算分为线性运算以及非线性运算,其计算误差主要来源于非线性运算,在非性运算中,噪声元的处理以及简化会使区间保守型激增^[13]。

仿射线性运算与仿射非线性运算:

$$\tilde{x} \pm \tilde{y} = x_0 \pm y_0 + \sum_{i=1}^n (x_i \pm y_i) \mu_i \tag{3}$$

$$\tilde{x} \times \tilde{y} = x_0 y_0 + \sum_{i=1}^n (x_0 y_i \pm x_i y_0) \mu_i +$$

$$\left(\sum_{i=1}^n |x_i| \right) \left(\sum_{i=1}^n |y_i| \right) \mu_{n+1}$$

$$\frac{1}{\tilde{y}} = \partial y + \beta + \delta \eta_{n+1} \tag{4}$$

其中, $\partial = -\frac{1}{ab}, \beta = \frac{1}{2a} + \frac{1}{2b} + \frac{1}{\sqrt{ab}}, \delta = \frac{1}{2a} + \frac{1}{2b} - \frac{1}{\sqrt{ab}}$ 。 a, b 分别是仿射区间的上限以及下限。

2.2 区间潮流及 Krawczyk-Moore 区间迭代法

区间潮流计算中各元素之间的耦合性会造成区间急剧扩大,造成巨大的误差,而仿射算法可处理元素与元素之间的耦合关系,从而减少区间潮流计算的误差^[14]。

通常情况下非线性迭代方程组采用牛顿迭代法

求解,而在每次迭代过程中都需要求矩阵的逆,计算繁琐,计算速度较慢,Krawczyk-Moore 算法很好的解决了这一问题^[15]。通过构造 Krawczyk-Moore 算法来解决每次迭代求逆的计算复杂问题,其加入了部分仿射算术。在潮流区间雅可比矩阵的线性运算中引入仿射算术,减小了区间潮流的上下限^[16-17]。

在常规潮流计算中,确定性潮流可写作:

$$\begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} AB \\ XY \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \theta \\ \Delta U \end{bmatrix} \quad (5)$$

$$\Delta P_i = P_i - U_i \sum_{j=1}^n U_j (G_{ij} \cos \theta_{ij} + B_{ij} \sin \theta_{ij}) \quad (6)$$

$$\Delta Q_i = Q_i - U_i \sum_{j=1}^n U_j (G_{ij} \sin \theta_{ij} - B_{ij} \cos \theta_{ij}) \quad (7)$$

其中 P_i, Q_i 分别代表 i 号节点中注入的有功功率以及无功功率。

Krawczyk-Moore 算子的构造中不需计算矩阵的逆,其算子如下:

$\mathbf{K}y\tilde{\mathbf{x}} = \mathbf{y} - \mathbf{Y} \cdot f(\mathbf{y}) - (\mathbf{I} - \mathbf{Y}\mathbf{F}'(\tilde{\mathbf{x}}))(\tilde{\mathbf{x}} - \mathbf{y}) \quad \forall \mathbf{y} \in \tilde{\mathbf{x}}$
其中 \mathbf{Y} 为 n 阶方阵; \mathbf{I} 为单位矩阵。Krawczyk-Moore 迭代式如下所示:

$$\begin{cases} \tilde{\mathbf{x}}^{i+1} = \tilde{\mathbf{x}}^i \cap K(\tilde{\mathbf{x}}^i) \\ K(\tilde{\mathbf{x}}^i) = \mathbf{y}^i - \mathbf{Y}^i f(\mathbf{y}^i) - (\mathbf{I} - \mathbf{Y}^i \mathbf{F}'(\tilde{\mathbf{x}}^i))(\tilde{\mathbf{x}}^i - \mathbf{y}^i) \\ \mathbf{y}^i = m(\tilde{\mathbf{x}}^i) \\ \mathbf{Y}^i = ({}^m((\mathbf{F}'\tilde{\mathbf{x}}^i))) - 1 \end{cases}$$

结合式(1)、(2)中的有功无功注入,根据式(3)可得仿射型区间潮流可如下建模:

$$\tilde{\mathbf{x}} = \begin{bmatrix} \tilde{\theta} \\ \tilde{U} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} [\underline{\theta}, \bar{\theta}] \\ [\underline{U}, \bar{U}] \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{F}'(\tilde{\mathbf{x}}^i) = - \begin{bmatrix} AB \\ XY \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} [\bar{A}, \bar{A}] & [\bar{B}, \bar{B}] \\ [\bar{X}, \bar{X}] & [\bar{Y}, \bar{Y}] \end{bmatrix}$$

在(4),(5),(6),(7)式中不难看出有多对变量耦合具有相关性,使用其进行区间潮流计算会造成巨大误差并使区间扩大,故引入仿射算术。(7)式可改写为:

$$\mathbf{K}\tilde{\mathbf{x}}^i = \mathbf{y}^i - \mathbf{Y}^i \cdot f(\mathbf{y}^i) - (\mathbf{I} - \mathbf{Y}^i \mathbf{F}'(\tilde{\mathbf{x}}^i))(\mathbf{R}^i \tilde{\boldsymbol{\mu}})$$

2.3 区间潮流计算步骤

设定自变量初值: \cdot , 再将自变量写作二阶仿射形式:

$$\text{IF}(\tilde{\mathbf{x}}^i) = \mathbf{M} + \mathbf{R}\tilde{\boldsymbol{\mu}} =$$

$$[m_1 + r_1 \tilde{\mu}_1, m_2 + r_2 \tilde{\mu}_2, + \dots +, m_n + r_n \tilde{\mu}_n]$$

$$\text{IF} \left(\begin{bmatrix} \underline{\theta}^i, \bar{\theta}^i \\ \underline{U}^i, \bar{U}^i \end{bmatrix} \right) = \begin{bmatrix} \frac{\underline{\theta}^i + \bar{\theta}^i}{2} \\ \frac{\underline{U}^i + \bar{U}^i}{2} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{\underline{\theta}^i - \bar{\theta}^i}{2} \\ \frac{\underline{U}^i - \bar{U}^i}{2} \end{bmatrix} \tilde{\boldsymbol{\mu}}$$

$$\text{其中 } \mathbf{M}^i = \begin{bmatrix} \frac{\underline{\theta}^i + \bar{\theta}^i}{2} \\ \frac{\underline{U}^i + \bar{U}^i}{2} \end{bmatrix}, \mathbf{R}^i = \begin{bmatrix} \frac{\underline{\theta}^i - \bar{\theta}^i}{2} \\ \frac{\underline{U}^i - \bar{U}^i}{2} \end{bmatrix} \text{ 而后根据式}$$

(5)可得:

$$\mathbf{F}'(\tilde{\mathbf{x}}^i) = \begin{bmatrix} [\bar{A}^i, \bar{A}^i] & [\bar{B}^i, \bar{B}^i] \\ [\bar{X}^i, \bar{X}^i] & [\bar{Y}^i, \bar{Y}^i] \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{Y}^k = \begin{bmatrix} \left[\frac{\bar{A}^i + \bar{A}^i}{2} \right] & \left[\frac{\bar{B}^i + \bar{B}^i}{2} \right] \\ \left[\frac{\bar{X}^i + \bar{X}^i}{2} \right] & \left[\frac{\bar{Y}^i + \bar{Y}^i}{2} \right] \end{bmatrix}$$

进而通过仿射算术计算 $\text{IF}(\mathbf{Y}^i \mathbf{F}'(\tilde{\mathbf{x}}^i))$, 将其结果转换为区间形式 $\text{IR}(\mathbf{Y}^i \mathbf{F}'(\tilde{\mathbf{x}}^i))$, 计算 $\text{IR}(\mathbf{I} - \mathbf{Y}^i \mathbf{F}'(\tilde{\mathbf{x}}^i))$, 并将其结果转换为仿射形式 $\text{IF}(\mathbf{I} - \mathbf{Y}^i \mathbf{F}'(\tilde{\mathbf{x}}^i))$, 运用仿射算术计算 $\text{IF}(\mathbf{I} - \mathbf{Y}^i \mathbf{F}'(\tilde{\mathbf{x}}^i)) \cdot (\mathbf{R}^i \tilde{\boldsymbol{\mu}})$ 进而将结果化为区间形式, 根据式(5)计算出 $K(\tilde{\mathbf{x}}^i)$, 再进行迭代, 其迭代表达式 $\tilde{\mathbf{x}}^{i+1} = \tilde{\mathbf{x}}^i \cap K(\tilde{\mathbf{x}}^i)$, 其迭代终止条件为: $|x^{i+1} - x^i| < \omega$ 且 $|\tilde{\mathbf{x}}^{i+1} - \tilde{\mathbf{x}}^i| < \omega$ 。

3 区域电网新能源消纳指标

3.1 区域电网新能源消纳指标

由于短时间内负荷与出力之间的差值, 区域电网电能无法外送的场景下, 全年因区域电网消纳能力不足而出现的消纳问题, 提出三个新能源消纳指标来直观显示区域电网的新能源消纳状况。

1) 区域电网新能源密度 $\bar{\tau}_t$ 表示在 t 时刻区域电网新能源发电机组出力占总出力的比值, 即: $\tau_t = p_{t, \text{newenergy}} / p_t$ 。 $\bar{\tau}_t$ 表示区域电网在一定时间段内新能源发电机组占总出力的比值, 可通过此指标分析区域电网出现消纳问题时, 可通过区域电网新能源密度 τ_t 分析可否通过火力发电机组进行调控。其在一定时间段内的区域电网新能源密度可表示为:

$$\bar{\tau}_t = \int_{t_2}^{t_1} \tau_t dt$$

通过区域电网新能源密度 τ_t , 可以间接反映区域电网中新能源发电机组出力对电网影响程度的大小, 在区域新能源密度较大时, 气候变化对区域电网的影响更大。

2) 区域电网新能源消纳水平 $\bar{\xi}$ 可表示区域电网在某一时间段对新能源消纳的能力大小, 其表达式可写为:

$$\bar{\xi} = s_{\text{newenergy}} / s_{\text{load}}$$

其可显示区域电网在一时间段中新能源消纳的状况, 若 $\bar{\xi} \geq 1$ 代表区域电网在此时间段中有部分新能源无法消纳, 需通过其他手段对区域电网进行调控, 若 $\bar{\xi} \leq 1$ 则代表区域电网可通过火电机组调整出力实现电网的稳定运行。其中 $\bar{\xi}$ 表达式可改写为:

$$\bar{\xi} = \int_0^t \frac{p_{t, \text{newenergy}}}{P_t} dt / t$$

通过区域电网新能源消纳水平 $\bar{\zeta}$ 可反映电网中新能源的整体消纳状况,可通过消纳水平指标结合超短期负荷预测提前规划火力发电机组的出力,保证新能源的完全消纳,减少弃风弃光。

3)区域电网新能源越界时间 T 此项指标反映了区域电网出现新能源消纳问题次数及维持的时间,可有效反应区域电网在不同时间段内新能源出力的波动强度及电网运行状况。此指标为一年中新能源出力大于区域电网最大负荷的总时间。

3.2 区域电网新能源消纳指标计算流程

区域电网消纳指标分析分为三个步骤:1)区域电网负荷侧负荷预测及计算,2)区域电网新能源出力预测及计算,3)根据区域电网出力及负荷计算新能源消纳指标。

首先通过 IEEE39 标准节点配电网建立区域电网模型,根据湖北某地区区域电网年负荷曲线预测区域电网年负荷曲线,并于各个节点设置其负荷值。

将区域电网的发电机组通过发电方式进行分类,分为风、光、水、火发电机组,建立数学模型,风电与地区风速相关联,光电与光照强度相关联,水电与区域水流量相关联,确定其一年不同时间段的出力区间。

根据仿射区间潮流计算结果绘制区域电网负荷及出力曲线,并通过 MATLAB 得到出力及负荷曲线的拟合函数,通过 3.1 中的区域电网新能源指标分析计算新能源消纳指标,通过新能源消纳指标的比较研究区域电网在一年不同时间段内的新能源消纳压力及消纳能力。

通过消纳指标的分析及计算可知区域电网在某一时间段的新能源消纳状况,并根据各发电机组的出力情况分析。以下为区域电网可能的新能源消纳场景:1)区域电网在某一时间段内新能源总出力大于区域电网总负荷,即区域电网必然存在新能源消纳问题,此时可通过水电站抽水蓄能解决消纳问题。2)区域电网新能源出力小于其负荷,即区域电网有一定可能出现新能源消纳问题,此时通过调整火电出力即可使区域电网稳定运行且不弃风,弃光。

上述两种场景通过各种手段调控后进一步计算区域电网新能源消纳水平 $\bar{\zeta}$,并比较对区域电网调控前的能源消纳水平 $\bar{\zeta}$ 可验证各调控手段有效性(图 1)。

4 区域电网仿射区间潮流仿真

4.1 区域电网负荷侧场景

根据某地区区域电网年负荷曲线设置本文中节点配电网负荷场景,其中 3、4、5、10、11 月负荷较低。

1、2、6、7、8、9 月负荷较高。其详细年负荷曲线见图 2。

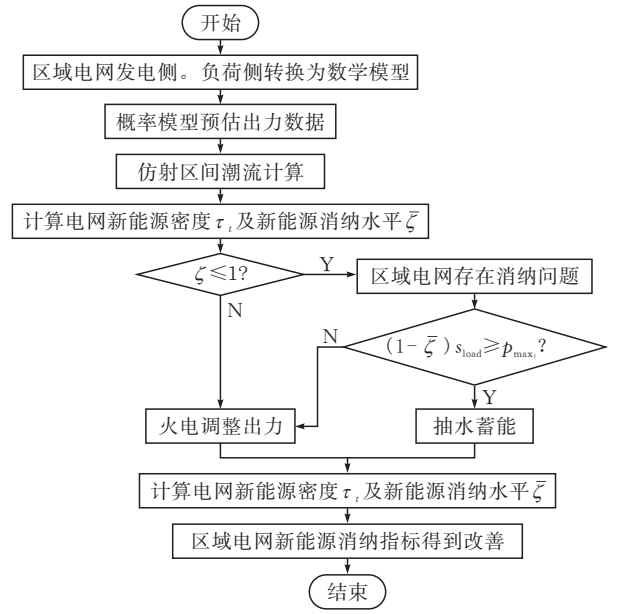


图 1 区域电网新能源消纳指标分析流程图

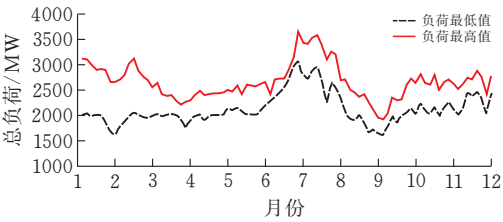


图 2 区域电网年负荷图

4.2 区域电网发电侧场景

将发电侧的发电机组转换为与风速,光照强度,水流量相关的数学模型。在此通过概率模型与数学模型的结合,初步预测区域电网新能源机组的出力曲线,将天气分为晴天、阴天、雨天三类,四个不同的季节对应 4 种不同的风速、光照强度、水流量。根据大多数地区的发电机组情况,水电和新能源的丰季为 6—10 月,枯季为 1—4 月及 12 月,平季为 5、11 月。根据文献[18]光伏在三个季节中的平均出力及出力曲线的研究,光伏发电在夏季为丰季,春秋为平季,冬季则为枯季。根据文献[19]中的研究,风电在春,冬季为丰季,夏季为枯季,秋季为平季。将一年 12 个月分为七个时间段,通过概率模型预估区域电网各发电机组的有功出力区间,详细数据见表 2。

4.3 区域电网模型

采用 IEEE39 标准节点配电网模型进行模拟研究。在 IEEE39 节点配电网中根据电网各发电机组的实际占比,在 IEEE39 标准节点模型中设置发电端,根据实际负荷情况及预测数据设置负荷侧负荷。

时间段	发电机组种类		
	水电	风电	光电
1—2	720—1130	432.70—459.57	536.8—605.8
3—4	700—1150	446.9—488.7	536.8—605.8
5	940—1650	446.9—488.7	498.6—543.9
6—9	1400—1750	498.56—526.4	440.7—463.5
10	1400—1750	446.9—488.7	498.6—543.9
11	960—1620	446.9—488.7	536.8—605.8
12	785—1190	498.56—526.4	440.7—463.5

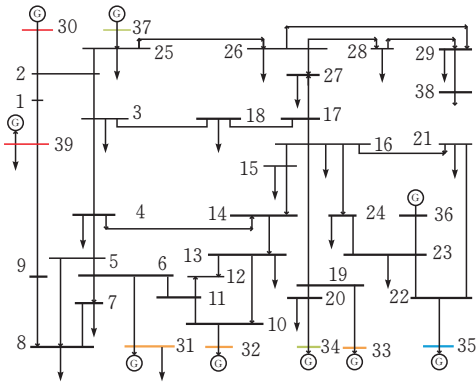


图 3 IEEE39 标准节点配电网单线图

4.4 算例仿真

在此根据 4.2 中提及的七个时间段分七种场景进行仿真见图 4、5、6。

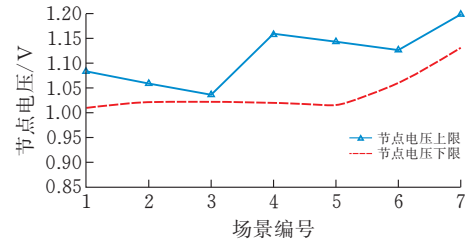


图 4 一号节点电压上下限

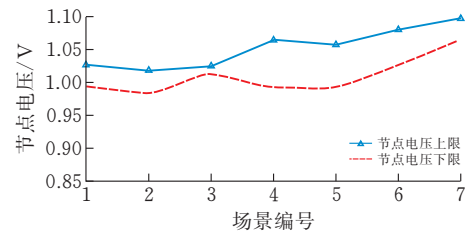


图 5 六号节点电压上下限

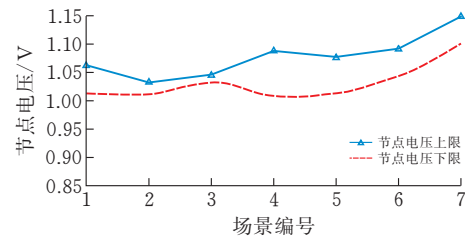


图 6 二十一号节点电压上下限

由第三种场景下的仿射区间潮流与确定潮流的对比可看出：仿射区间潮流计算在计算节点电压及

注入节点的功率时仿射区间潮流保守性相对较小，而计算节点电压相角时仿射区间潮流保守性较大，仿射区间潮流的节点注入功率在保守性上主要体现在仿射区间的上限，随着功率的增大，仿射区间的上限不断增大，而其下限并无明显变化。在此通过 Krawczyk-Moore 算法减小仿射型区间潮流计算得保守性，缩小计算结果得区间上限以减小误差。

由图 4、5、6 可得，当区域电网出现消纳问题时。不仅可能产生频率波动及弃风、弃光等问题，还可能造成区域电网部分节点过压。

4.5 仿真分析及新能源消纳指标计算

将电网最高值的年负荷曲线与区间上限做对比（图 7），进行区域电网消纳指标的计算。图 8 为区域电网未加入抽水蓄能前区域电网三种新能源消纳指标。

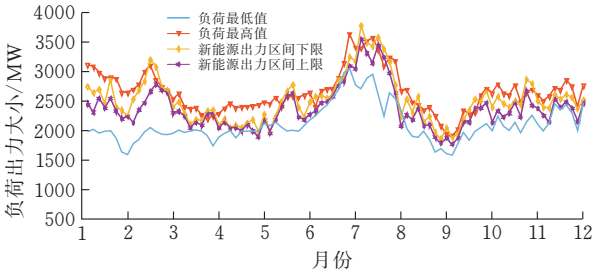


图 7 区域电网出力及负荷年曲线

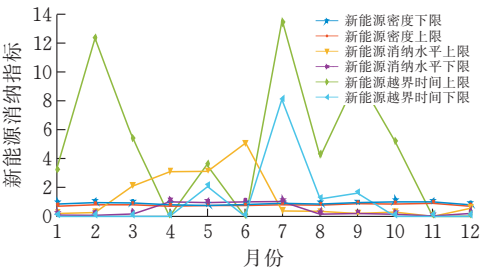


图 8 各月份区域电网新能源消纳指标

区域电网在新能源出力上限时有四个时间段存在消纳问题，只能通过抽水蓄能及其他储能手段解决区域电网消纳问题，在节点 8、15、16 号节点设置 200 MW 的抽水蓄能水电站，将水力发电站转换为抽水蓄能站，继而分析在加入抽水蓄能调控后区域电网的新能源消纳指标（图 9）。

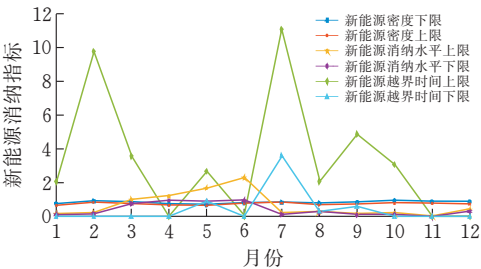


图 9 加入抽水蓄能后各月份区域电网新能源消纳指标

加入抽水蓄能后，区域电网新能源密度降低，可

供火力发电调节的范围增大,区域电网消纳水平明显提高,虽未完全解决电网新能源消纳问题,但区域电网消纳能力大幅增强。

由年负荷/出力曲线图及年消纳指标表可知

1)在区域电网电能无法外送的情况下,3—6月电网对新能源消纳可能出现较大的问题,12月可能出现不严重的消纳问题,其余月份新能源消纳问题较小。

2)大多数场景下,区域电网负荷水平较高时新能源大部分都能被顺利消纳。

3)在水电为丰水季,火力发电机组正常运行的情况下,风光发电的不确定性易导致区域电网出现消纳问题。

4)区域电网消纳能力在加入抽水蓄能站后明显增强,储能方式可有效提高区域电网新能源消纳能力。

根据以上 IEEE39 节点配电网的仿真可知:三个区域消纳指标的分析可直观观察区域电网新能源消纳状况及可行的调控手段,可通过抽水蓄能或发电站制氢等方实现调峰。并可以通过区域电网新能源密度判断区域电网新能源占比,或可通过火电出力调节解决新能源消纳能力不足的问题。通过区域电网新能源消纳水平可提前规划一定时间段中的火电出力,并根据实时出力—负荷曲线实现通过减少火电出力及蓄能调峰缓解区域电网消纳问题。

5 结论及分析

大量新能源接入电网给的电网调度规划带来了不便,在外送通道关闭的情况下,地区电网新能源消纳存在一定的隐患。本文结合随机潮流中的仿射型区间潮流计算在 IEEE39 节点中进行了算例分析,通过仿射型区间潮流计算不同时段发电机运行状态对注入电网的功率分析,绘制出区域电网出力曲线区间,在 MATLAB 中通过函数拟合计算其消纳指标。分析了区域电网易出现消纳问题的时间段以及场景。在区域电网新能源出现消纳问题时可通过抽水蓄能等方法在电能无法外送时解决其问题^[20],抽水蓄能在本文中较为简略,后续会根据其选址、抽水时间、最优运行方式做进一步研究。

[参 考 文 献]

[1] 邵振国,黄耿业,张嫣,等.固定噪声元的预测—校正型仿射潮流迭代算法[J].中国电机工程学报,2021,41(7):2331-2341.

[2] 鲍海波,郭小璇.求解含风电相关性区间潮流的仿射变换最优场景法[J].电力系统保护与控制,2020,48(18):114-122.

[3] 丁涛,柏瑞,郭庆来,等.一种非迭代仿射算法的输电网区间潮流计算方法[J].中国电机工程学报,2013,33(19):76-83+17.

[4] 廖小兵,刘开培,李彧野,等.基于混合潮流方程的区间潮流计算方法[J].高电压技术,2018,44(10):3417-3424.

[5] 费迎阳,江岳文,洪启腾.交直流混合配电网改进区间潮流算法[J].电网技术,2021,45(7):2683-2692.

[6] 陈鹏伟,肖湘宁,唐松浩,等.交直流混合配电网区间潮流等效算法[J].中国电机工程学报,2019,39(4):979-992.

[7] 彭寒梅,昌玲,郭颖聪,等.主从控制微电网的动态区间潮流计算[J].电网技术,2018,42(1):195-203.

[8] 陈鹏伟,肖湘宁,MESUT BARAN.计及分布式电源无功特性的弱环配电网复仿射潮流算法[J].电力系统自动化,2019,43(7):59-66.

[9] 李国庆,董存,梁志峰,等.考虑光伏发电不确定性的跨省两级优化调度模型[J/OL].高电压技术:1-14[2021-08-25].

[10] 邵振国,黄新东,等.基于多场景改进 Krawczyk 区间潮流算法的分布式新能源多目标优化配置[J].电网技术,2021,45(5):1818-1827.

[11] 艾欣,周树鹏,赵阅群.考虑风电不确定性的用户侧分时电价研究[J].电网技术,2016,40(5):1529-1535.

[12] 徐鹏超.双馈变速风电机组的主动惯量支撑与一次调频控制研究[D].济南:山东理工大学,2020.

[13] 黄耿业,邵振国,黄圆皓,等.仿射型区间潮流算法应用与展望[J].电网技术,2021,45(7):2675-2682.

[14] 丁涛,柏瑞,郭庆来,等.一种非迭代仿射算法的输电网区间潮流计算方法[J].中国电机工程学报,2013,33(19):76-83,17.

[15] 黄耿业,邵振国,黄圆皓,等.仿射型区间潮流算法应用与展望[J].电网技术,2021,45(7):2675-2682.

[16] 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+642.

[17] 马伟哲,程韧俐,史军,等.考虑风电场模型的仿射区间潮流计算[J].广东电力,2019,32(11):28-37.

[18] 王建学,张耀,万筱钟.光伏出力特性指标体系和分类典型曲线研究[J].电力需求侧管理,2017,19(5):8-12.

[19] 刘文霞,何向刚,吴方权,等.新能源发电出力特性指标及其数据化应用[J].电网与清洁能源,2020,36(9):85-92.

[20] 李国庆,李欣彤,边竞,等.计及光伏—负荷预测不确定性的直流跨省互联网双级调度策略[J].中国电机工程学报,2021,41(14):4763-4776.

Research on Grid Consumption Index Based on Affine Interval Power Flow Algorithm

WANG Yanyang¹, TONG Huamin¹, LIU Zimin², LI Huangqiang¹, HAN Lu¹, ZHU Jiang¹

(1 *State Grid Hubei Electric Power Co.,Ltd.Yichang Power Supply Company,Yichang 443200,China* ;
2 *School of Electrical and Electronic Engineering , Hubei Univ. of Tech., Wuhan 430068, China*)

Abstract: Regional power grids with more new energy generating units are prone to new energy consumption problems when the transmission channel is closed. The randomness of the power injected into the grid by new energy is strong, and the power flow distribution also changes accordingly. Interval power flow calculation can analyze such problems. This paper proposes a set of regional power grid new energy consumption indicators based on the affine interval power flow algorithm. Firstly, the power generation side and load side of the regional power grid are transformed into a mathematical model, and the power generation side is combined with the affine interval power flow algorithm to predict the upper and lower limits of the regional new energy output. “Regional power grid new energy density”, “regional power grid new energy consumption level”, and “regional power grid new energy cross border time”are introduced. It is to predict the capacity and probability of insufficient new energy consumption capacity of regional power grid, and to study the feasibility of alleviating the pressure of grid absorption. Finally the feasibility of the method proposed in this paper is verified through simulation and comparison of the calculation of the absorption index.

Keywords: affine algorithm; new energy consumption; grid operation; interval power flow

[责任编辑：张岩芳]

(上接第 29 页)

Research on MPPT of Photovoltaic Under Partial Shading Condition Based on GWO-P&O Algorithm

SHEN Lei,XU Anfei,HUANG Qingyu,YU Jiachuan

(*Hubei Key Laboratory for High Efficiency Utilization of Solar Energy and Operation Control of Energy Storage System , Hubei Univ. of Tech., Wuhan 430068, China*)

Abstract: In practical photovoltaic system engineering, due to the influence of changes in light intensity, the output power voltage curve of photovoltaic array often presents multi—peak phenomenon. The traditional maximum power point tracking (MPPT) algorithm is easy to be trapped in the local optimal solution and cannot accurately track the maximum value. Aiming at the maximum power point tracking of photovoltaic array under partial shading condition (PSC), a composite control algorithm GWO P&O algorithm combining grey wolf optimization (GWO) and perturbation & observe (P & O) is proposed. Firstly, the global search ability of Gray Wolf algorithm is used to locate the range of maximum power point, and then the small step disturbance observation method is used to find the accurate maximum power point. A complete system simulation model is constructed by Matlab / Simulink. The simulation results show that the disturbance observation method falls into the local optimal solution under partial shading conditions and does not track the maximum power point. Compared with the grey wolf algorithm, the tracking efficiency of the composite algorithm reaches 100 % under local shadow conditions, which increases by 1.11%. The convergence time is shortened from 0.8s to 0.5s, and the convergence time is increased by 35 %. Therefore, the algorithm takes into account the speed and accuracy of the maximum power point tracking. System simulation verifies the correctness and effectiveness of the algorithm.

Keywords: maximum power point tracking; partial shading condition; grey wolf optimization; perturbation & observe

[责任编辑：张岩芳]