

doi: 10.11835/j.issn.1000-582X.2022.203

# 考虑风电随机性的交直流系统协调二级电压控制方法

崔 惟<sup>1</sup>, 曹逸凡<sup>2</sup>, 李程昊<sup>1</sup>, 张紫薇<sup>2</sup>, 刘明洋<sup>1</sup>, 张 皓<sup>1</sup>, 颜 伟<sup>2</sup>

(1. 国网河南省电力公司电力科学研究院, 郑州 450052; 2. 重庆大学 输配电装备及系统安全与新技术  
国家重点实验室, 重庆 400044)

**摘要:** 为了应对风电随机波动导致的送端电网潮流大规模变化、换流母线电压扰动, 进一步导致换流站离散设备额外动作, 提出考虑风电随机性的交直流系统协调二级电压控制方法: 首先通过定义功率相对偏差来描述风电波动程度, 筛选出二级电压控制中不能忽略风电功率波动的特征时段; 然后采用 k-means 聚类方法得到特征时段风电出力的典型场景; 最后利用概率场景法来表示风电的随机性, 借助机会约束法解决不确定性优化问题。基于修改的 IEEE39 节点算例系统进行仿真并验证所提方法的有效性。

**关键词:** 电力系统; 协调二级电压控制; 风电接入; 交直流系统; 不确定性优化

中图分类号: TM712

文献标志码: A

文章编号: 1000-582X(2023)09-041-11

## Coordinated secondary voltage control method of AC/DC system considering wind power randomness

CUI Wei<sup>1</sup>, CAO Yifan<sup>2</sup>, LI Chenghao<sup>1</sup>, ZHANG Ziwei<sup>2</sup>, LIU Mingyang<sup>1</sup>, ZHANG Hao<sup>1</sup>,  
YAN Wei<sup>2</sup>

(1. Electric Power Scientific Research Institute of State Grid Henan Province Electric Power Company, Zhengzhou 450052, P. R. China; 2. State Key Laboratory of Power Transmission Equipment & System Security and New Technology, Chongqing University, Chongqing 400044, P. R. China)

**Abstract:** To address the challenges posed by large-scale changes of the sending grid tide and the voltage disturbance in converter buses caused by random fluctuation of wind power, which further leads to additional actions of the discrete equipment in the converter station, this paper proposes a coordinated secondary voltage control method for AC-DC systems that consider the randomness of wind power. Firstly, the degree of wind power fluctuation is quantified by defining the relative deviation of power, and characteristic time periods of wind power fluctuation which cannot be ignored in the secondary voltage control are identified. Next, the k-means clustering method is employed to obtain typical scenarios of wind power output during these characteristic time periods. Finally, the probabilistic scenario method is used to represent the randomness of wind power, and the uncertainty optimization problem is solved using the chance constraint method. The effectiveness of the proposed method is validated through simulations conducted on a modified IEEE39 node arithmetic system.

收稿日期: 2021-10-15 网络出版日期: 2022-02-16

基金项目: 国网河南省电力公司科技项目资助(52170220009X)。

Supported by Science and Technology Project of State Grid Henan Province Electric Power Company (52170220009X).

作者简介: 崔惟(1986—), 男, 高级工程师, 博士, 主要从事电力系统优化运行与控制研究, (E-mail)cuiwei\_sgcc@163.com。

通信作者: 颜伟, 男, 教授, 博士生导师, (E-mail)cqyanwei@cqu.edu.cn。

**Keywords:** power systems; coordinated secondary voltage control; wind power fluctuation; AC-DC system; uncertainty optimization

随着电力系统电压无功控制技术的日益发展,分级电压控制已经成为中国各省级电网调控中心能量管理系统的核心功能<sup>[1-4]</sup>。二级电压控制处于分级电压控制的中间层,有着不可或缺的地位。在当前中国风电大规模通过直流线路远距离传输电力的背景下,将存在一些风电功率短时波动较大的时间段,二级电压控制中计算周期内潮流分布不变的假设不再成立,导致现有确定性交直流协调二级电压控制<sup>[5-7]</sup>的效果在风电大规模集中接入的前提下难以保证,因此有必要研究考虑风电随机性的交直流系统协调二级电压控制。

由于风电功率随机性、间歇性的波动,大规模风电的集中接入极大地增加了电力系统电压无功控制的难度和复杂度<sup>[8-9]</sup>,因此需要分析风电功率随机波动性,为二级电压控制决策是否考虑风电随机性提供参考。风力发电功率是一个随机变量,可以用全场景来模拟其随机性。为了满足计算效率的要求,需要对场景进行压缩减小计算规模。在场景模拟方面,Shi等<sup>[10]</sup>用场景对风机的随机出力进行描述,建立了含多台风机的发电调度优化模型。王玲玲等<sup>[11]</sup>利用概率场景法描述风电功率的随机性和负荷功率的随机扰动,建立考虑不同风机之间时空相关性的配网无功优化模型。在场景压缩方面,k-means聚类是一种常用的场景压缩方法,实现起来简单方便。明杰等<sup>[12]</sup>用k-means聚类方法对风电原始数据进行聚类,并通过聚类指标确定最优聚类数。Fang等<sup>[13]</sup>提出一种基于k-means聚类的对于初始点要求过强的风电场分类方法。

文中从直流近区协调二级电压控制的角度出发,用某实际风电场的全年以1 min为采样周期的数据作为全场景<sup>[14]</sup>来表示风电波动的随机性,通过k-means聚类方法<sup>[12,15]</sup>对场景进行压缩,按照距离代价函数指定场景聚类数,将特征时段的场景压缩成多个典型场景,实现对风电功率波动的场景模拟。对于所筛选出的特征时段,在考虑换流站离散设备动作要求的协调二级电压控制模型<sup>[5]</sup>基础上,提出了考虑风电随机性的交直流系统协调二级电压控制模型,借助机会约束规划法<sup>[16-18]</sup>对不确定性优化问题进行求解。

## 1 风电功率随机波动特性分析及其场景模拟方法

### 1.1 风电功率随机波动特性分析

文中以某风电场群A的2019年全年以1 min为采样周期的风电有功功率数据为基础,来分析研究风电功率的波动特性。该风电场群的总风机数为552台,装机容量为752.4 MW,通过220 kV汇集站并入电网。

风电功率呈现显著的随机波动特性,风电场群A的全年功率曲线如图1所示。由图可知,年大部分时间内日均出力都是小于额定出力,少部分时间达到额定出力,风电出力介于零与装机容量之间随机波动。日内的风电出力同样波动很大,最小出力接近于零,最大出力接近于550 MW,不利于电力系统的安全稳定运行。从季节尺度看,冬春季出力相对较大,在12月时达到最大值,在夏秋季出力相对较低,在8月达到最小值,这是由本地冬春季季风较强、夏季季风较弱的风速季节分布特点决定的。

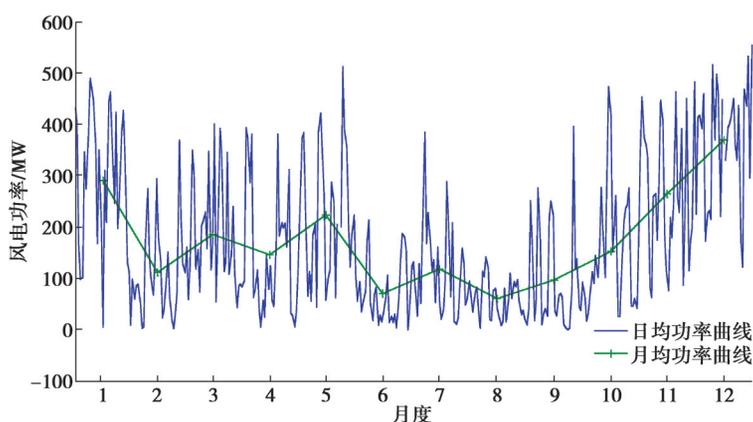


图1 风电场群A全年功率曲线

Fig. 1 Annual power curve for wind farm cluster A

由图2可知,风电场群功率变化一阶差分量概率密度曲线为窄高型、概率分布集中、离散程度小、功率波动小;单机功率变化一阶差分量概率密度曲线为宽矮型、概率分布宽、离散程度大、功率波动大。整体上按单机、风电场、风电场群规模化方向风电出力波动性依次减弱,表现出“平滑效应”,即区域总体波动性减弱的空间互补效应。

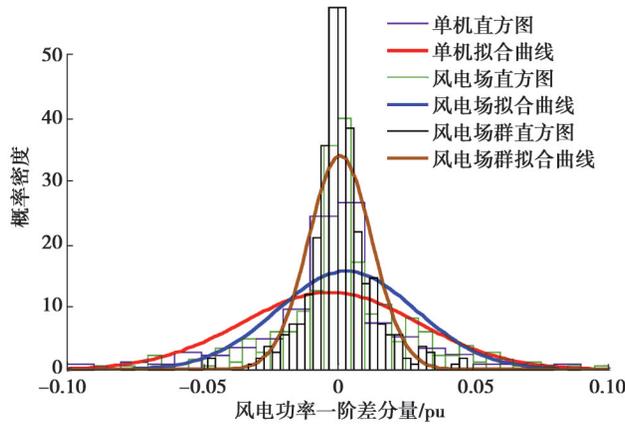


图2 风电场功率变化一阶差分分布

Fig. 2 First-order difference distribution of wind farm power variation

综上所述,从风电出力在不同时间尺度下的波动规律、日内特性和季节差异等方面分析风电的波动时间效应,从单机、风电场和风电场群3个角度分析风电波动特性与风电功率的空间相关性,如表1所示。

表1 风电场群A的风电波动特性概况表

Table 1 Wind power fluctuation characteristics of wind farm cluster A

特性	风电有功出力概况
随机性	日内出力峰谷相差悬殊;日间峰谷时段不固定
日内时间效应	波动幅度随时间尺度的拉长而减小;夜晚出力相对较小
季节效应	峰谷差:春季>秋季>冬季>夏季。整体均值:冬季>春季>秋季>夏季
空间效应	存在空间互补效应,波动性:单机>风电场>风电场群

## 1.2 风电功率波动的特征时段选取

确定性交直流系统协调二级电压控制<sup>[5]</sup>建立在随机源荷功率在控制周期内保持不变的假设之上,当随机源荷在控制周期内波动很小时,该控制策略基本能够满足重要节点电压的控制要求和节点电压的安全约束。然而,当随机源荷在控制周期内波动过大时,不仅会导致重要节点电压偏离期望值过大,影响换流站近区电压质量,增加换流站离散设备额外投切风险,而且会影响换流站近区无功潮流在已有控制策略下分布不均,发电机发出无功不均衡等问题。因此,文中定义控制周期内有功功率相对偏差来描述风电的波动特性,描述风电功率波动程度,具体表达式为

$$\rho\% = \frac{P(t_0+t) - P(t_0)}{P(t_0)}, \quad (1)$$

其中,

$$\begin{cases} P(t_0) = P(t_0) + \Delta\tilde{P}, \\ \Delta P = P(t_0+t) - P(t_0), \end{cases} \quad (2)$$

式中: $t_0$ 为控制周期初始时刻; $t$ 为控制周期, $t$ 取值为15 min; $P$ 为风电功率,可以表示成当前时刻的风电功率测量值与随机功率偏差之和; $\Delta P$ 为风电功率在控制周期内的波动值功率; $\rho\%$ 为功率相对偏差。特别地,控制周期初始时刻的偏差为零。

文中认为当控制周期内的风电功率波动会引起变电站电压无功控制设备的电容器投切动作则为大幅波

动,反之则认为是小幅波动。因此,在协调二级电压控制周期内,以调节发电机无功出力为主要手段,尽可能快速、连续平衡源荷功率的大幅波动,避免换流站离散设备额外投切动作,减小电压无功控制成本。风电大幅波动的界定条件为

$$\Delta Q > DQ_c, \quad (3)$$

式中: $\Delta Q$ 为风电无功功率偏差; $D$ 为补偿电容器的死区系数; $Q_c$ 为一组电容器容量。

将全年有功无功数据按季节和时段来进行划分,根据经验认为一个时段内有20%以上的时刻其风电波动为大幅波动,就将其界定为特征时段筛选出来。并认为在特征时段内的协调二级电压控制需要考虑风电的随机性,而其他时段的协调二级电压控制则不需要考虑风电的随机性。

### 1.3 基于k-means聚类的风电功率场景压缩方法

风电原始场景规模较大,会在随机优化中出现计算速度较慢的问题。为了提高计算效率,可将原始场景压缩成少量具有代表性的典型场景来替代大规模原始场景。文中采用在传统风电场景聚类中应用较多的k-means聚类方法,将欧式距离作为评价指标,聚类后的 $K$ 个聚类中心点即为保留场景,具体步骤如下。

1) 设样本容量为 $N$ ,每个样本的观测指标为 $M$ ,需要聚类的数据为 $Z_{N \times M}$ ,指定聚类数目 $k$ 。初始时刻 $t=1$ ,选择 $k$ 个样本作为初始凝聚点 $Z_j(t) (j=1,2,\dots,K)$ 。

2) 计算每个样本到初始聚类中心的欧式距离 $D(Z_i, Z_j) (i=1,2,\dots,N)$ ,找到最小的欧式距离,则样本 $Z_i$ 属于 $C_m$ 类。遍历每个样本,对所有样本完成一次聚类,每一类中有 $n_j$ 个样本。最小的欧式距离为:

$$D(Z_i, Z_m(t)) = \min \{ D(Z_i, Z_j(t)), i=1,2,\dots,N \}, m \in [1, L]. \quad (4)$$

3) 更新 $K$ 个新的聚类中心,作为每一类样本的均值, $Z_j^{(j)}$ 表示第 $j$ 类的样本,则

$$Z_j(t+1) = \frac{1}{n_j} \sum_{i=1}^{n_j} Z_i^{(j)}. \quad (5)$$

4) 若聚类中心不再变化,即 $Z_j(t+1) = Z_j(t)$ 时,则聚类过程结束,否则返回步骤2)。

设第 $i$ 个典型场景包含的样本数为 $N_i$ 个,则该典型场景概率为

$$P_i = N_i / N. \quad (6)$$

通过式(6),可依次计算出各典型场景的概率。典型场景反映初始样本整体的随机状态,其概率之和为1。在k-means聚类法中,聚类后的场景数应事先设定,而场景数如何选择的关键是建立聚类有效性指标进行评价。文中引入距离代价函数<sup>[9]</sup>作为评价最佳聚类数有效性的指标,表达式为

$$\begin{cases} F = L + D, \\ L = \sum_{i=1}^k |m_i - m|, \\ D = \sum_{i=1}^k \sum_{p \in C_i} |p - m_i|, \end{cases} \quad (7)$$

式中: $F$ 为距离代价函数,为类际距离和类内距离之和; $L$ 为类际距离,为所有聚类中心到空间中心的距离; $D$ 为类内距离,为每个簇内部的样本到其聚类中心的距离的总和; $m$ 为所有样本的平均值, $m_i$ 为簇 $C_i$ 所含样本的平均值; $k$ 为聚类数; $p$ 为空间内任一样本。

不同的聚类数导致距离代价函数有不同,距离代价函数 $F$ 越小,聚类效果越好。通常情况下,最佳聚类数 $K \leq \sqrt{n}$ 。

## 2 考虑风电随机性的交直流系统协调二级电压控制模型

对于风电波动较大的特征时段,风电功率的随机波动对换流站近区电压无功的影响不可忽略,因此笔者在文献[5]的基础上引入风电功率波动的随机性,建立考虑风电随机性的交直流系统协调二级电压控制模型。假设给定无功分区中,有 $n_p$ 个中枢点, $n_g$ 个受控发电厂节点, $n_w$ 个风电节点, $n_d$ 个送端换流站,下标 $s$ 来表示场景变量, $s=1,2,\dots,N$ ,所建控制模型以下详细介绍。

### 2.1 目标函数

考虑中枢点电压偏差和发电机无功均衡度的目标函数为

$$\min_{\Delta V_g} \sum_{s=1}^N \rho_s (W_a \| (V_p^0 - V_{\text{ref}}) + C_{pw} \Delta Q_{w,s} + C_p \Delta V_{g,s} \|^2 + W_q \| \mu_{g,s} \|^2), \quad (8)$$

$$\mu_{g,i,s} = \frac{Q_g^0 + C_{gf} \Delta V_{g,s} + C_{gwi} \Delta Q_{w,s} - Q_g^{\min}}{Q_g^{\max} - Q_g^{\min}}, i = 1, 2, 3, \dots, n_g, \quad (9)$$

式中: $s$ 为场景, $\rho_s$ 为场景 $s$ 的概率, $N$ 为场景个数, $W_a$ 和 $W_q$ 为2个目标的权重; $V_p^0$ 和 $V_{\text{ref}}$ 分别为中枢节点电压当前值和参考值向量,维数均为 $n_p \times 1$ ;  $C_p$ 和 $C_{pw}$ 分别为中枢点电压对发电机机端电压和风电无功功率的灵敏度矩阵,维数分别为 $n_p \times n_g$ 和 $n_p \times n_w$ ;  $\Delta Q_{w,s}$ 为场景 $s$ 下的风电无功功率偏差向量,维数为 $n_w \times 1$ ;  $\mu_{g,s}$ 和 $\Delta V_{g,s}$ 为场景 $s$ 下的发电机无功出力比例和发电机机端电压调节量向量,维数为 $n_g \times 1$ ;  $\|\mu_{g,s}\|$ 为发电机无功均衡因子,其中的第 $i$ 个分量为 $\mu_{g,i,s}$ ;  $Q_g^0$ 、 $Q_g^{\text{ref}}$ 、 $Q_g^{\min}$ 和 $Q_g^{\max}$ 分别为发电机无功出力当前值、参考值、上限和下限向量,维数均为 $n_g \times 1$ ;  $C_g$ 和 $C_{gw}$ 分别为发电机无功出力对发电机机端电压和风电无功功率的灵敏度矩阵,维数分别为 $n_p \times n_p$ 和 $n_p \times n_w$ ,  $C_{gf}$ 和 $C_{gwi}$ 分别为 $C_g$ 和 $C_{gw}$ 的第 $i$ 行。

目标函数中包含2项:第一项为中枢点与换流母线节点电压偏差最小目标,表示所有中枢点与换流母线节点的电压当前值与其参考值之差的平方和尽可能小;第二项为发电机无功出力均衡度目标,表示分区内所有发电机无功出力比例的平方和尽可能小。假设中枢点电压偏差最小目标的优先级高于发电机无功出力均衡目标,即目标权重 $W_a$ 大于 $W_q$ ,目标函数为双目标的场景期望最小。

## 2.2 约束条件

模型考虑的约束条件包括发电机的控制能力约束、换流器的控制能力约束、中枢点电压安全约束和换流站关口无功约束。在采用机会约束规划法处理随机约束时,考虑到发电厂高压侧母线电压约束为决策变量约束,发电机的无功出力约束和发电厂高压母线电压的单步调整量约束为刚性的物理约束,换流器触发角约束和换流站关口无功约束是为了使换流变压器分接头和无功补偿设备不动作,要求这些约束必须100%满足,而发电机机端电压控制变量约束和其余的潮流不等式约束则允许有一定的概率可不满足。基于上述约束处理思路,以下所建模型约束方程的具体表示。

1) 发电厂高压侧母线电压单步调整量约束为

$$\Delta V_h = C_h \Delta V_{g,s} + C_{hw} \Delta Q_{w,s}, \quad (10)$$

$$|\Delta V_h| \leq \Delta V_h^{\max}, \quad (11)$$

式中: $\Delta V_h$ 和 $\Delta V_h^{\max}$ 为发电厂高压侧的母线电压的单步调整量及其最大允许值,维数为 $n_g \times 1$ ;  $C_h$ 和 $C_{hw}$ 分别为发电厂高压侧母线电压对发电机机端电压和风电无功出力的灵敏度矩阵,维数分别为 $n_g \times n_g$ 和 $n_g \times n_w$ ;  $\Delta V_h$ 为决策变量,其值不随风电场景的变化而变化,因此没有下标 $S$ 。

2) 发电厂高压侧母线电压上下限约束

$$V_h^{\min} \leq V_h^0 + \Delta V_h \leq V_h^{\max}, \quad (12)$$

式中: $V_h^0$ 、 $V_h^{\min}$ 和 $V_h^{\max}$ 分别为发电厂高压侧母线电压的当前值、上限和下限,维数均为 $n_g \times 1$ 。

3) 中枢母线电压上下限约束

$$P \{ V_p^{\min} \leq V_p^0 + C_p \Delta V_{g,s} + C_{pw} \Delta Q_{w,s} \leq V_p^{\max} \} > \alpha_p, \quad (13)$$

式中: $V_p^{\min}$ 和 $V_p^{\max}$ 分别为中枢点电压上限和下限,维数均为 $n_p \times 1$ ;  $\alpha_p$ 为此约束的置信度。

4) 发电机无功出力上下限约束

$$Q_g^{\min} \leq Q_g^0 + C_g \Delta V_{g,s} + C_{gw} \Delta Q_{w,s} \leq Q_g^{\max}. \quad (14)$$

5) 发电机机端电压上下限约束

$$P \{ V_g^{\min} \leq V_g^0 + \Delta V_{g,s} \leq V_g^{\max} \} > \alpha_g, \quad (15)$$

式中: $V_g^0$ 、 $V_g^{\min}$ 和 $V_g^{\max}$ 为发电机机端电压当前值、上限和下限;维数均为 $n_g \times 1$ ;  $\alpha_g$ 为此约束的置信度。

6) 换流器触发角上下限约束

$$\cos \theta_d^{\min} \leq \cos \theta_d + C_d \Delta V_{g,s} + C_{dw} \Delta Q_{w,s} \leq \cos \theta_d^{\max}, \quad (16)$$

式中: $\cos \theta_d^0$ 、 $\cos \theta_d^{\min}$ 和 $\cos \theta_d^{\max}$ 为换流器触发角余弦的当前值、上限和下限,维数均为 $n_d \times 1$ ;  $C_d$ 和 $C_{dw}$ 分别为换流器触发角余弦对发电机机端电压和风电无功出力的灵敏度矩阵,维数分别为 $n_d \times n_g$ 和 $n_d \times n_w$ 。

## 7) 换流关口无功上下限约束

$$Q_d^{\min} \leq Q_d^0 + C_n \Delta V_{g,s} + C_{nw} \Delta Q_{w,s} \leq Q_d^{\max}, \quad (17)$$

式中： $Q_d^0$ 、 $Q_d^{\min}$ 和 $Q_d^{\max}$ 分别为换流站关口无功的当前值、上限和下限，维数均为 $n_d \times 1$ ； $C_n$ 和 $C_{nw}$ 为换流站关口无功对发电机机端电压、风电无功出力的灵敏度矩阵，维数分别为 $n_d \times n_g$ 和 $n_d \times n_w$ 。换流站关口无功的上下限值由无功补偿设备的死区确定。

由式(10)–(17)可知，文中所建立的考虑风电随机性交直流系统协调二级电压控制模型的目标函数为二次函数，约束方程为线性函数，是一个不确定性二次规划问题。文中通过 Matlab 软件平台 quadprog 函数的调用对其进行求解。

### 3 算例仿真

#### 3.1 风电场景处理

##### 3.1.1 风电特征时段选取

文中所选取的风电场群 A 的 220 kV 汇集站，配备的电容器一组容量为 8 Mvar，假定电容器的死区为 80%，则换算到电容器动作的功率偏差  $\Delta Q$  为 6.4 Mvar。对风电场群 A 典型日的有功无功数据进行统计分析，可以拟合得到式(18)所示函数。其中，拟合参数分别为： $\mu$ 和方差为 337.8，确定系数为 0.996，均方根为 0.435 4。

$$Q = -1.007 \times 10^8 + 1.007 \times 10^8 \times \cos(1.333 \times 10^{-5} P) + 1617 \times \sin(1.333 \times 10^{-5} P)。 \quad (18)$$

通过前文提出风电功率波动的特征时段筛选方法，遍历原始数据，筛选出符合条件的春季 12:00—19:00 的 7 个时段作为特征时段，其功率偏差概率密度曲线如图 3 所示。

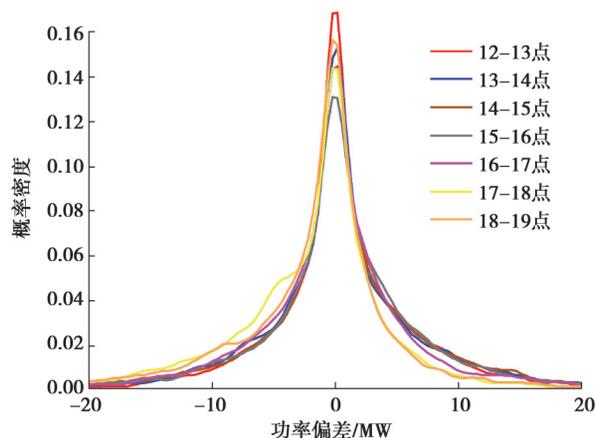


图3 春季 12:00—19:00 特征时段风电波动概率分布

Fig. 3 Probability distribution of wind power fluctuation in the characteristic period of 12:00-19:00 in spring

图 3 中，7 个特征时段功率偏差概率密度曲线对称分布，在  $[-10, 10]$  区间分布较为集中。7 个特征时段功率最大偏差分别为 44.44、37.39、42.61、53.44、56.17、64.85、126.01 MW，远高于夏季、秋季、冬季偏差值。

##### 3.1.2 基于 k-means 聚类的场景压缩

文中在进行场景压缩时增加和风电场群 A 处于一个县地理位置相近的风电场群 B，认为其特征时段和 A 相同。2 个风电场均接入 220 kV 的汇集站，风电场群 A 装机容量为 752.4 MW，风电场群 B 装机容量为 1 233 MW。2 个风电场群 A 和 B 的数据均为 2019 年以每 1 min 为采样间隔的风电功率实测数据，不存在相关性问题。现对 2 个风电场群一个特征时段春季 17:00—18:00 以 1 min 为采样周期的数据进行场景压缩。基于风电功率数据，生成不同  $k$  值下的距离代价函数曲线，如图 4 所示。

由图 4 可知，距离代价函数整体上先快速下降后在  $[0.5, 1]$  区间内振荡，当聚类数  $K=20$  时，距离代价函数最小，因此对于这一特征时段的风电场景，聚类数选为 20。

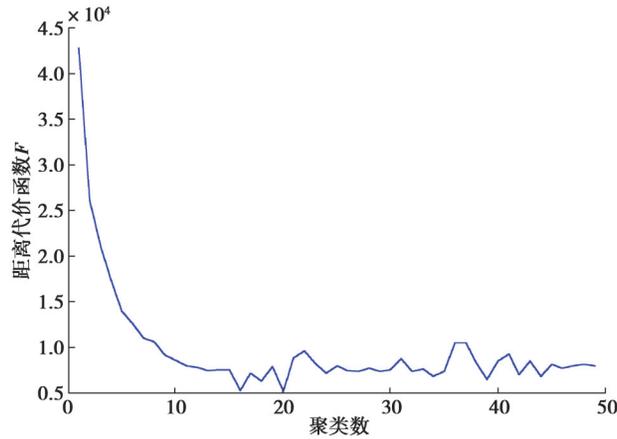


图 4 聚类有效性指标与聚类数的关系

Fig. 4 Relationship between clustering validity index and clustering number

在 Matlab R2014 软件下,基于 k-means 聚类方法,对风电功率偏差数据进行场景压缩,可以得到压缩后的场景及其概率如表 2 所示。此时压缩后的 20 个风电典型场景,其类内距离为 1 292.5,类际距离为 528.6。

表 2 压缩后的场景

Table 2 Compressed scenarios

场景	风电场群 A 无功功率偏差/Mvar	风电场群 B 无功功率偏差/Mvar	概率
1	-5.06	21.76	0.008 9
2	-14.05	47.85	0.000 7
3	-6.61	9.18	0.036 8
4	-27.54	22.59	0.001 3
5	-69.71	-10.32	0.000 2
6	9.79	18.80	0.032 2
7	-8.44	-2.47	0.043 3
8	-2.62	3.12	0.096 7
9	2.56	-21.86	0.019 6
10	-59.73	-18.00	0.000 5
11	-0.17	-0.55	0.327 2
12	23.70	12.54	0.014 3
13	6.58	-1.70	0.085 7
14	3.09	3.17	0.118 7
15	1.57	-7.07	0.069 0
16	2.96	10.09	0.067 0
17	16.31	-6.84	0.020 5
18	-1.29	-58.04	0.002 5
19	-36.52	-16.05	0.001 1
20	12.31	6.34	0.053 8

### 3.2 考虑风电随机性的交直流系统协调二级电压控制仿真

#### 3.2.1 基础数据

以修改的 IEEE39 节点算例系统为基础,在发电节点 31 和 32 旁增加节点 40 和 41,模拟发电厂高压侧母线,修改的 IEEE39 节点系统分区和中枢点信息如表 3 所示。接线图及分区方案<sup>[20]</sup>如图 5 所示。基于异步电网的背景,在 4 号节点处接入送端直流换流站,直流线路与远端异步电网相连。送端换流站采用定功率、定换流变压器变比控制,受端换流站采用定电压、定熄弧角控制。送端换流站的直流功率为 1.086 p.u.(基准功

率为1 000 MW),受端换流站通过控制直流电压使送端直流电压维持在0.92 p.u.(基准电压为5 00 kV)。换流变压器的当前变比为1.09,调节范围为 $1\pm 15\times 0.01$ 。换流变压器等值电抗为 $0.1\ \Omega$ ,换相效应系数为0.995。在换流站内有并联电容器作为无功补偿装置,一组额定容量为80 Mvar,组数是6组。换流器触发角的范围是 $8^\circ\sim 18^\circ$ 。

系统划分为4个无功分区,图中红圈所示为中枢纽点,蓝圈所示为换流母线节点,加入发电厂高压侧母线后新增的4条支路参数见表4所示。

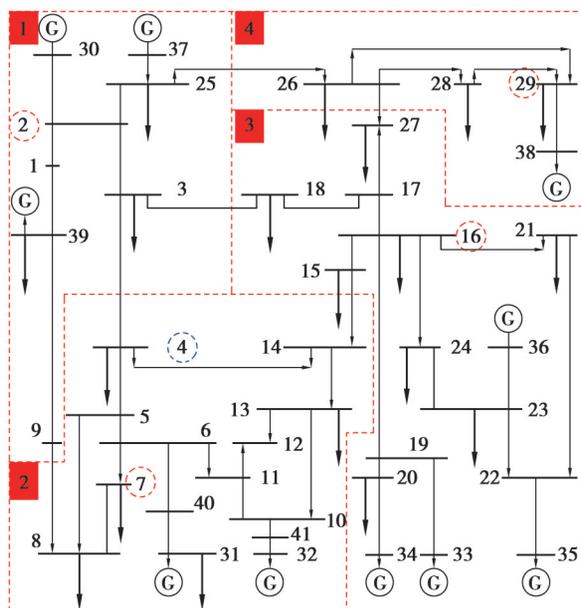


图5 修改的IEEE39节点系统4分区示意图

Fig. 5 Partition of modified IEEE39 node system 4

表3 修改的IEEE39节点系统分区和中枢点信息

Table 3 Partition and pilot bus information of modified IEEE39 node system

无功分区	中枢纽点	可控发电机
1	2	30,37,39
2	7	31,32
3	16	33,34,35,36
4	29	38

表4 新增支路参数

Table 4 New branch parameters

支路	电阻/p.u.	电抗/p.u.	变比
40—31	0	0.023 1	1.07
41—32	0	0.020 3	1.07
6—40	0	0.000 4	1.00
10—41	0	0.000 4	1.00

风电并网点为节点5和14,5节点接入风电场群A,14节点接入风电场群B。风电节点5和14的初始有功功率分别为5 MW和8 MW,初始无功功率分别为10 Mvar和6 Mvar。以风电场群A和B春季17:00—18:00时段的数据为样本,风电场群A和B的装机容量分别为752.4 MW和1 233 MW,通过统计可以得到20个基于风电初始功率的功率偏差典型场景及其概率如表1所示。风电接入点均在2号无功分区,中枢纽点7的电压对风电节点有功功率灵敏度为 $5.10\times 10^{-4}$ 和 $1.21\times 10^{-3}$ ,中枢纽点7的电压对风电节点无功功率灵敏度为

$1.01 \times 10^{-2}$ 和 $1.27 \times 10^{-2}$ , 中枢点电压对风电节点无功功率灵敏度为对风电节点有功功率灵敏度的10倍以上, 因此文中提出的协调二级电压控制模型可以忽略风电有功功率波动对节点电压的影响。

对2号无功分区进行协调二级电压控制的仿真, 其他分区的发电机和负荷参数保持不变。节点电压安全范围设置为: 中枢点电压为0.95~1.05 p.u., 发电机机端电压和发电厂高压侧母线电压为0.9~1.1 p.u., 发电机机端电压单步最大调整量为0.01 p.u.。设定中枢点电压约束和发电机机端电压约束的置信水平为90%。

### 3.2.2 仿真方案

为验证文中所提方法的有效性, 在网络参数和运行条件皆相同的条件下, 对2号无功分区采用以下2种控制方案。

方案1: 不考虑风电随机性的交直流系统协调二级电压控制。

方案2: 文中提出的协调二级电压控制。

### 3.2.3 仿真结果与分析

表5给出了2种方案的发电厂高压侧母线电压控制策略, 表中 $\Delta V_{h40}$ 和 $\Delta V_{h41}$ 分别为发电厂高压侧母线节点40和节点41的电压调节量。将其应用到所有风电场景中, 得到2种方案下的控制效果, 如表6所示。

表5 2种方案的发电厂高压侧母线电压控制策略

Table 5 Two schemes of bus voltage control strategy

方案	发电厂高压侧母线的电压调节量/p.u.	
	$\Delta V_{h40}$	$\Delta V_{h41}$
方案1	0.002 5	0.006 9
方案2	-0.001 4	0.004 2

表6 2种方案下的控制效果

Table 6 Control effect under two schemes

方案	中枢点电压偏差平均值/p.u.	换流站母线电压偏差均值/p.u.	发电机无功均衡因子	换流站吸收无功均值/p.u.	触发角越限次数
方案1	0.028 9	0.014 3	1.411 0	0.335 4	32
方案2	0.017 6	0.011 8	1.403 2	0.324 7	0

从交流系统指标来看, 在考虑了风电随机性后, 方案2的中枢点电压偏差平均值为0.017 6, 比方案1降低了0.011 3, 下降幅度为39.10%。方案2的换流站母线电压偏差平均值为0.011 8, 比方案1降低了0.002 5, 下降幅度为17.48%。方案1的无功均衡因子为1.411 0, 方案2的无功均衡因子为1.403 2, 较方案1降低了0.007 8, 下降幅度为0.56%, 表明方案2中发电机的无功出力更均衡。这说明了文中提出的考虑风电随机性的交直流系统协调二级电压控制能够适应控制周期内各种可能的风电出力, 在全场景下能够降低中枢点和换流站节点的电压偏差, 提高电压质量, 提高发电机无功出力均衡度, 有利于交直流系统的稳定运行。

从直流系统指标来看, 方案2的换流站吸收无功比方案1略降低了0.011; 方案1的换流器触发角的越限次数为32次, 而方案2的越限次数减少到0次。这是因为换流器触发角约束和换流站无功关口约束是必须完全满足的约束, 使得换流变压器分接头以及无功补偿装置减少不必要的动作。相应地, 为了增加控制的弹性, 发电机控制变量约束与网络约束则允许在一定的概率下不必全部满足。文中提出的模型计及了风电功率波动对换流器触发角的影响, 充分调动交流侧发电机的电压无功调节能力, 大幅减少由于交流侧随机扰动导致的换流器触发角越限, 降低换流变压器分接头动作次数。

综上所述, 在风电大幅波动下, 考虑风电随机性的交直流系统协调二级电压控制方法能够进一步保证多风电接入的交直流系统的电压质量, 降低中枢节点与换流站母线的电压偏差, 提高发电机无功均衡度, 减少直流设备动作次数, 整体控制效果突出。

## 4 结论

风电的随机性一直是新能源发电有待攻克的难点之一,文中通过对风电场群进行功率特性分析,针对风电波动较大的场景,提出了考虑风电随机性的交直流系统协调二级电压控制方法,明确了发电厂高压母线的决策变量性质以及发电机机端电压的随机控制变量性质,采用概率场景法将风电随机功率偏差表示成典型场景,通过机会约束规划法解决不确定性优化问题。文中所提出的方法有如下特点:

1)考虑了风电功率波动的随机性,并用随机功率偏差来表示,采用概率场景法来描述这种随机性,表示为风电无功功率偏差的多个典型场景;

2)明确了公共的决策变量和随机的控制变量,考虑到二级电压控制对一级电压控制的决策问题,选取发电机机端电压作为随机控制变量,发电厂高压侧母线电压这一状态变量作为决策变量,在所有场景下控制变量不同,而决策变量保持不变;

3)采用机会约束规划法处理随机的目标函数和约束,要求目标函数的期望最小并使满足节点电压安全约束的概率大于一个置信水平;

4)本模型在风电波动较大的时段优势明显,能够适应风电未来一段时间内各种可能的出力情况,显著减小中枢点电压偏差,降低了中枢点和发电机机端电压的越限风险,具有重要的工程价值。

## 参考文献

- [ 1 ] 孙宏斌,郭庆来,张伯明,等.面向网省级电网的自动电压控制模式[J].电网技术,2006(S2):13-18.  
Sun H B, Guo Q L, Zhang B M, et al. Automatic voltage control scheme for large-scale power networks[J]. Power System Technology, 2006(S2): 13-18.(in Chinese)
- [ 2 ] 张明晔,郭庆来,孙宏斌,等.应用于北美电网的自动电压控制系统设计与实现[J].电网技术,2013,37(2):349-355.  
Zhang M Y, Guo Q L, Sun H B, et al. Design and implementation of automatic voltage control system applied to a power grid in northeast US[J]. Power System Technology, 2013, 37(2): 349-355.(in Chinese)
- [ 3 ] Duan J J, Shi D, Diao R S, et al. Deep-reinforcement-learning-based autonomous voltage control for power grid operations[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2020, 35(1): 814-817.
- [ 4 ] Yuan K L, Lin S J, Liu M B, et al. Analysis of steady state voltage stability in large scale power grid including actions of CSVC [C]//2012 Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference. IEEE, 2012: 1-5.
- [ 5 ] 颜伟,胡显文,崔惟,等.考虑LCC-HDVC设备额外动作要求的协调二级电压控制方法[J].电网技术,2022,46(4):1511-1518.  
Yan W, Hu X W, Cui W, et al. Coordinated secondary voltage control method considering additional action requirements of LCC-HDVC equipment [J]. Power System Technology, 2022, 46(4):1511-1518. (in Chinese)
- [ 6 ] Xu F D, Guo Q L, Sun H B, et al. A secondary voltage control method for an AC/DC coupled transmission system based on model predictive control[C]//2015 IEEE Power & Energy Society General Meeting. IEEE, 2015: 1-5.
- [ 7 ] 陈江澜,张蓓,兰强,等.特高压交直流混合电网协调电压控制策略及仿真研究[J].电力系统保护与控制,2014,42(11):21-27.  
Chen J L, Zhang B, Lan Q, et al. Research on strategy and simulation of coordinated automatic voltage control for UHVDC/AC hybrid grid [J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(11): 21-27. (in Chinese)
- [ 8 ] 薛禹胜,雷兴,薛峰,等.关于风电不确定性对电力系统影响的评述[J].中国电机工程学报,2014,34(29):5029-5040.  
Xue Y S, Lei X, Xue F, et al. A review on impacts of wind power uncertainties on power systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(29): 5029-5040.(in Chinese)
- [ 9 ] Dhabai P, Tiwari N. Effect of stochastic nature and location change of wind and solar generation on transmission lattice power flows[C]//2020 International Conference for Emerging Technology (INCET). IEEE, 2020: 1-5.
- [ 10 ] Shi J, Lee W J, Liu X F. Generation scheduling optimization of wind-energy storage system based on wind power output fluctuation features[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2018, 54(1): 10-17.
- [ 11 ] 王玲玲,王昕,郑益慧,等.计及多个风电机组出力相关性的配电网无功优化[J].电网技术,2017,41(11):3463-3469.  
Wang L L, Wang X, Zheng Y H, et al. Reactive power optimization of distribution network considering output correlation of multiple wind turbines[J]. Power System Technology, 2017, 41(11): 3463-3469.(in Chinese)

- [12] 明杰, 向红吉, 戴朝华, 等. 大规模风电接入的运行场景无功优化评估[J]. 电网技术, 2016, 40(9): 2737-2742.  
Ming J, Xiang H J, Dai C H, et al. Operation scenario reactive power optimization assessment with large-scale wind farm integration[J]. Power System Technology, 2016, 40(9): 2737-2742.(in Chinese)
- [13] Fang R M, Shang R Y, Wu M L, et al. Application of gray relational analysis to k-means clustering for dynamic equivalent modeling of wind farm[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2017, 42(31): 20154-20163.
- [14] 吴丽珍, 蒋力波, 郝晓弘. 基于最优场景生成算法的主动配电网无功优化[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(15): 152-159.  
Wu L Z, Jiang L B, Hao X H. Reactive power optimization of active distribution network based on optimal scenario generation algorithm[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(15): 152-159.(in Chinese)
- [15] 林俐, 潘险险, 张凌云, 等. 基于免疫离群数据和敏感初始中心的K-means算法的风电场机群划分[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(20): 5461-5468, 5722.  
Lin L, Pan X X, Zhang L Y, et al. The K-means clustering algorithm for wind farm based on immune-outlier data and immune-sensitive initial center[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(20): 5461-5468, 5722.(in Chinese)
- [16] 王成福, 梁军, 张利, 等. 基于机会约束规划的风电预测功率分级处理[J]. 电力系统自动化, 2011, 35(17): 14-19.  
Wang C F, Liang J, Zhang L, et al. Classified treatment of wind power predictive power based on chance constrained programming[J]. Automation of Electric Power Systems, 2011, 35(17): 14-19.(in Chinese)
- [17] 雷亚洲, 王伟胜, 印永华, 等. 基于机会约束规划的风电穿透功率极限计算[J]. 中国电机工程学报, 2002, 22(5): 32-35.  
Lei Y Z, Wang W S, Yin Y H, et al. Wind power penetration limit calculation based on chance constrained programming[J]. Proceedings of the CSEE, 2002, 22(5): 32-35.(in Chinese)
- [18] Zhang H, Li P. Chance constrained programming for optimal power flow under uncertainty[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2011, 26(4): 2417-2424.
- [19] 李永森, 杨善林, 马溪骏, 等. 空间聚类算法中的K值优化问题研究[J]. 系统仿真学报, 2006, 18(3): 573-576.  
Li Y S, Yang S L, Ma X J, et al. Optimization study on K value of spatial clustering[J]. Journal of System Simulation, 2006, 18(3): 573-576.(in Chinese)
- [20] 崔惟. 风电并网电力系统电压无功控制的概率决策方法研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2017.  
Cui W. Probabilistic decision methods of voltage and reactive power control for wind power integrated power system[D]. Chongqing: Chongqing University, 2017. (in Chinese)

(编辑 詹燕平)