

新能源

# 基于EMPC的分布式光伏集群频率控制策略

魏万俊<sup>1</sup>, 刘毅<sup>1</sup>, 裴凯<sup>1</sup>, 房德智<sup>2</sup>

(1. 甘肃国能风力发电有限公司, 兰州 730020;

2. 国电南瑞科技股份有限公司电网安全稳定控制技术分公司, 南京 211000)

**摘要:** 为提升光伏发电并网效果, 发挥分布式光伏的调频能力, 提出一种基于EMPC(扩展模型预测算法)的分布式光伏集群频率控制策略。首先, 基于模糊子空间聚类算法, 考虑集群电压稳定和辅助调频性能, 选取合适的分群指标, 将大规模分布式光伏单元划分成基于分群指标的分布式光伏集群; 然后, 基于分群结果构建分布式光伏集群模型, 引入状态扩展变量获得系统频率响应的动态预测模型, 设计考虑分布式光伏集群出力预测误差和集群控制增量的EMPC目标函数对模型进行滚动优化和反馈校正; 最后, 在不同工况下进行仿真分析, 结果表明所提控制策略可以提高分布式光伏集群并网的频率支撑能力, 降低系统的功率损耗。

**关键词:** 分布式光伏集群; EMPC; 动态响应; 模糊子空间聚类; 频率调节

**DOI:** 10.19585/j.zjdl.202312012

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



## A frequency control strategy of distributed photovoltaic cluster based on EMPC

WEI Wanjun<sup>1</sup>, LIU Yi<sup>1</sup>, PEI Kai<sup>1</sup>, FANG Dezhi<sup>2</sup>

(1. Gansu Guoneng Wind Power Co., Ltd., Lanzhou 730020, China;

2. Power Grid Security and Stability Control Technology Branch of Guodian NARI Technology Co., Ltd., Nanjing 211000, China)

**Abstract:** To enhance the integration of solar power generation into the grid and harness the frequency regulation capabilities of distributed solar photovoltaics, a distributed photovoltaic cluster frequency control strategy based on EMPC (extended model predictive control) algorithm is introduced. Firstly, a fuzzy subspace clustering algorithm that takes account of cluster voltage stability and auxiliary frequency regulation performance is employed. Appropriate clustering indicators are selected to divide large-scale distributed photovoltaic units into distributed photovoltaic clusters based on these indicators. Next, based on the clustering results, a model for the distributed photovoltaic cluster is constructed. State expansion variables are introduced to obtain a dynamic predictive model for the system's frequency response. An EMPC objective function that considers the output prediction error of the distributed photovoltaic cluster and the cluster control increment is designed to perform rolling optimization and feedback correction of the model. Finally, simulation analysis is conducted under various operating conditions. The results demonstrate that the proposed control strategy can enhance the frequency support capability of distributed photovoltaic clusters when integrated into the grid and reduce power losses in the system.

**Keywords:** distributed photovoltaic clusters; EMPC; dynamic response; fuzzy subspace clustering; frequency regulation

## 0 引言

由于世界范围内环境问题突出, 能源供给长

期不足, 因此许多国家都在大力加强能源技术的研究和开发, 推动新能源的应用, 建立能源储备体系, 以寻求能源最优配置, 缓解能源危机<sup>[1-2]</sup>。分布式光伏在我国已获得了广泛的应用, 且随着“双碳”目标的不断推进, 应用规模还将持续扩大<sup>[3-5]</sup>。如今, 分布式能源正在配电网中迅速部

署, 这给平衡电力系统和稳定系统频率带来了新的挑战 and 机遇。随着大量的分布式光伏单元接入电网, 分布式光伏的输出功率占比不断增大, 对系统频率的稳定性产生了一定影响<sup>[6-7]</sup>。

光伏电源的出力具有随机性和不确定性, 电力系统面对大规模分布式光伏电源接入时, 存在通信过程繁琐、电能质量差、控制成本较高<sup>[8-10]</sup>等问题, 而集群划分则为处理大规模分布式光伏单元提供了新的思路<sup>[11-12]</sup>。作为目前针对分布式电源集群划分最常用的方法之一, 聚类算法在大规模新能源的调度和控制中得到广泛的应用。文献[13]提出了一种大规模光伏发电厂的在线聚类建模方法, 使用逆变器的控制参数作为聚类指标, 但聚类结果无法表现光伏电站自身的运行特性。文献[14]通过分析历史天气数据, 将分布式光伏划分成运行特征相似的分布式光伏集群, 但无法体现光伏出力的集群性控制特征。文献[15]提出了基于动态特征的波形聚类指标两阶段光伏电站集群动态聚类等效建模方法, 将难以获取的控制参数转化为测量数据, 一定程度上反映了整个光伏系统的动态特性。文献[16-18]均采用K-means算法对分布式光伏进行分群, 但K-means算法对初始值敏感并容易收敛到局部最优, 分群结果的准确性有待提高。文献[19-20]基于FCM聚类算法对分布式光伏进行分群, 提高了聚类精度, 但对于高维数据或数据集中的多个特征进行聚类时, 会导致计算量过大。

分布式光伏集群参与系统调频并非简单的集群出力相加, 要考虑到调控中心的实际需求, 采取合适的频率控制策略对分布式光伏集群进行调控。文献[21]以最小电网损耗量作为集群优化控制的目标, 提出了基于粒子群算法的分布式光伏微电站集群优化控制研究; 文献[22]提出了一种分布式光伏集群鲁棒虚拟同步化控制方法, 解决了集群系统惯性不足的同时, 提升了系统的动态性能; 文献[23]提出了一种分布式光伏集群的有功自校正控制方法, 利用备用分布式光伏单元预先补偿受扰分布式光伏集群的出力波动; 文献[24]提出以模型预测控制为基础的分布式光伏集群协调控制策略, 构建了光伏集群与配电网的仿真模型, 一定程度上减小了电网线路的损耗。

为在既提高能源利用率、降低功率损耗的情况下, 又满足系统调频的动态响应性能, 本文提出一种分布式光伏集群协调控制方法, 基于模糊子空间聚类算法, 考虑集群电压稳定和辅助调频性能, 选取合适的分群指标, 将大规模分布式光伏单元划分成相应的分布式光伏集群; 通过引入状态扩展变量得到系统频率响应的动态预测模型, 利用考虑分布式光伏集群输出预测误差和集群控制增量的EMPC(扩展模型预测算法)目标函数对模型进行滚动和反馈校正优化; 最后通过MATLAB/Simulink仿真对所提出控制器模型和其他控制器进行对比评估, 验证了该集群划分方法的合理性和集群控制策略的有效性。

## 1 含分布式光伏集群的系统频率响应模型

本章将确定分布式光伏的分群指标和聚类算法, 并根据分群结果对分布式光伏集群进行多机等值模型建模, 建立分布式光伏集群等效模型的系统频率响应模型。首先依据结构特点和运行要求, 选取合适的分群指标; 然后考虑动态分群的快速性和灵活性, 选择分群准确度高、分群效率快的FSC(模糊子空间聚类)算法对分布式光伏单元进行聚类; 最后基于分群结果建立分布式光伏集群等效模型, 探究含光伏的电力系统频率响应模型的频率响应特性。

### 1.1 分布式光伏分群指标分析

分布式光伏集群中一般含有数十甚至上百个中小型分布式光伏单元, 对每个分布式光伏单元建立详细的模型会导致仿真维数高、计算效率低。本文所提光伏集群划分的目的是实现分布式光伏最大程度参与辅助调频, 不仅考虑集群间电压调控需求, 还需要兼顾集群辅助调频性能。为了对每个分布式光伏集群的调频参数进行合理、简便的设置, 选取能描述各集群可调节容量和体现系统频率调节速度的分群指标。集群中各分布式光伏单元所处位置的光照强度、温度等环境条件不尽相同, 不同的外界环境条件都对应一个功率输出最大点, 与之关联的各分布式光伏集群运行参数也不尽相同。具体的分布式光伏分群指标如表1所示。

### 1.2 模糊子空间聚类原理

模糊子空间聚类算法<sup>[25]</sup>能根据所选K个初始

表1 分布式光伏分群指标

Table 1 Indicators of distributed photovoltaic cluster

指标	含义	指标	含义
$V_{pv}$	稳压电压	$L_{dc}$	Boost升压电路的电感
$L_f$	滤波器电感	$C_{dc}$	Boost升压电路的电容
$k_{ip}$	电流外环控制器比例系数	$k_{ii}$	电流外环控制器积分系数
$k_{op}$	电压外环控制器比例系数	$k_{oi}$	电压外环控制器积分系数
$I_x$	光照强度	$T_{pv}$	光伏板温度

聚类中心点,自动无监督地将待聚类数据集中所有数据归为 $K$ 簇。FSC算法通过查找规则子空间簇,让原始数据的每个维度都与每个簇关联,并基于各个维度中簇的密度,决定分配给该维度的权重。模糊子空间聚类能将高维数据空间转化到其相关的子空间进行聚类,因此在解决高维数据集聚类时准确性较高。

定义模糊子空间聚类算法的目标函数为:

$$\min_{U, V, W} J_{FSC} = \sum_{i=1}^K \sum_{j=1}^N u_{ij} \sum_{d=1}^D w_{id}^{\tau} (x_{jd} - v_{id})^2 + \sigma \sum_{i=1}^K \sum_{d=1}^D w_{id}^{\tau} \quad (1)$$

式中: $J_{FSC}$ 为目标函数; $U$ 为模糊划分矩阵; $V$ 为给定的 $K$ 个聚类中心; $W$ 为权重向量组成的模糊特征权重矩阵; $K$ 为初始聚类中心点个数; $D$ 为原始数据集维度数; $N$ 为子空间簇数; $\tau$ 是维度权重的模糊系数; $\sigma$ 是一个小的正则化常数; $x_{jd}$ 代表集合中的各元素坐标; $v_{id}$ 代表聚类中心矩阵元素为各聚类中心的坐标; $w_{id}$ 为权重向量组成的模糊特征权重; $u_{ij}$ 代表隶属度矩阵元素为样本对各簇的隶属度值; $i$ 代表第 $i$ 个聚类中心; $j$ 代表第 $j$ 个子空间簇数; $d$ 代表某元素的第 $d$ 个维度。

通过求导来对分布式光伏聚类中心点进行更新,求出在约束条件下目标函数求局部最小值的必要条件是:

$$v_{id} = \frac{\sum_{j=1}^N u_{ij} x_{jd}}{\sum_{j=1}^N u_{ij}} \quad (2)$$

$$w_{id} = \frac{\left( \sum_{j=1}^N u_{ij} (x_{jd} - v_{id})^2 + \sigma \right)^{-\frac{1}{\tau-1}}}{\sum_{d=1}^D \left( \sum_{j=1}^N u_{ij} (x_{jd} - v_{id})^2 + \sigma \right)^{-\frac{1}{\tau-1}}} \quad (3)$$

$$u_{ij} = \begin{cases} 1, & \sum_{k=1}^D w_{ik}^{\tau} (x_{jk} - v_{ik})^2 \leq \sum_{k=1}^D w_{ik}^{\tau} (x_{jk} - v_{ik})^2, \\ & i = 1, 2, \dots, K \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (4)$$

约束条件为:

$$u_{ij} \in \{0, 1\}, i \in [1, K], j \in [1, N], \sum_{i=1}^K u_{ij} = 1 \quad (5)$$

$$w_{id} \in [0, 1], \sum_{d=1}^D w_{id} = 1, d \in [0, D] \quad (6)$$

### 1.3 分布式光伏集群等效模型

光伏发电系统主要由光伏阵列、Boost变换器、逆变器、变压器等构成。通常情况下,低压直流电容与光伏阵列连接,即通过改变电容电压便可实现光伏阵列输出功率的改变。太阳能无污染、高效、可循环利用以及能够大规模的灵活装机,将其并入电网,可以在一定程度上缓解电网压力。文献[26]中详细介绍了光伏系统的建模,可得光伏发电系统等效如式(7)所示:

$$G(s) = \frac{K_1}{s + \alpha_1} \cdot \frac{s + \alpha_2}{s + \alpha_3} \quad (7)$$

式中: $G(s)$ 为光伏发电系统传递函数; $K_1$ 为光伏发电功率系数; $\alpha_1$ 、 $\alpha_2$ 、 $\alpha_3$ 为光伏简化模型零极点系数。

### 1.4 系统频率响应模型

图1为本文所采用的系统频率响应模型,该模型包含传统系统频率响应模型及模型预测控制下的分布式光伏集群模型。为了表示系统中参与调频辅助服务的分布式光伏集群,在系统调频动态模型中,用多个反馈调节环节来表征分布式光伏调频的作用。其中, $H$ 、 $D$ 、 $K$ 、 $R$ 分别为等效惯性时间常数、系统阻尼系数、积分环节增益和电力系统的调速系数; $T_g$ 和 $T_t$ 分别为调速器与涡轮机的时间常数; $U_{pv}$ 为模型预测控制器的控制信号; $\Delta f$ 和 $\Delta P_g$ 分别为频率偏差和调速器位置的变化; $\Delta P_{PV}$ 和 $\Delta P_t$ 分别为分布式光伏集群和涡轮机总输出功率的变化; $\Delta P_L$ 为负荷扰动; $\alpha$ 为频率偏差对主控制器的分配系数; $N_{PV}$ 为分布式光伏集群的个数。

对于主控制器,等效调速器、涡轮机和电力系统的频率动态由以下方程描述:

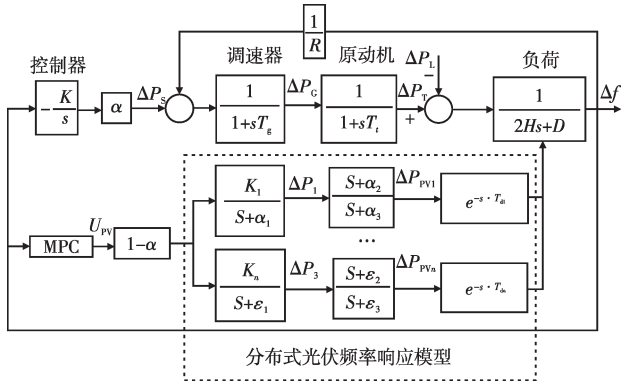


图 1 含光伏的电力系统频率响应模型

Fig.1 Frequency response model of power system incorporating photovoltaics

$$\Delta \dot{f}(t) = -\frac{D}{2H} \Delta f(t) + \frac{1}{2H} \Delta P_1(t) + \frac{1}{2H} \Delta P_{PV}(t) - \frac{1}{2H} \Delta P_L(t) \quad (8)$$

$$\Delta \dot{P}_s(t) = -K\alpha \Delta f(t) \quad (9)$$

$$\Delta \dot{P}_g(t) = -\frac{1}{RT_g} \Delta f(t) - \frac{1}{T_g} \Delta P_g(t) + \frac{1}{T_g} \Delta P_s(t) \quad (10)$$

$$\Delta \dot{P}_1(t) = -\frac{1}{T_t} \Delta P_1(t) + \frac{1}{T_t} \Delta P_g(t) \quad (11)$$

$$\Delta \dot{P}_1(t) = -\alpha \Delta P_1(t) + K_1(1-\alpha)U_{PV}(t) \quad (12)$$

$$\Delta \dot{P}_{PV}(t) = \sum_{i=1}^{N_{PV}} (\chi_2^i - \chi_1^i) \Delta P_1(t) - \chi_3^i \Delta P_{PV}(t) + K_i(1-\alpha)U(t) \quad (13)$$

式中:  $\chi_1^i$ 、 $\chi_2^i$ 、 $\chi_3^i$  分别对应第  $i$  台风电机组的简化模型零极点参数;  $K_i$  为第  $i$  组光伏发电功率系数;  $\Delta P_1(t)$  和  $\Delta P_s(t)$  为辅助变量。

## 2 基于 EMPC 的分布式光伏集群调频控制策略

### 2.1 状态空间模型

为简化分析, 以分布式光伏的聚类中心数  $N_{PV}=3$  为例, 系统控制矩阵  $A$ 、输入控制矩阵  $B$ 、输出控制矩阵  $C$  以及干扰控制矩阵  $F$  的具体形式为:

$$A = \begin{bmatrix} -\frac{D}{2H} & 0 & 0 & \frac{1}{2H} & 0 & \frac{1}{2H} & 0 & \frac{1}{2H} & 0 & \frac{1}{2H} \\ -K\alpha & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{1}{RT_g} & -\frac{1}{T_g} & -\frac{1}{T_g} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{T_t} & -\frac{1}{T_t} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -\alpha_1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \alpha_2 - \alpha_1 & -\alpha_3 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -\beta_1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \beta_2 - \beta_1 & -\beta_3 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -\epsilon_1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \epsilon_2 - \epsilon_1 - \epsilon_3 \end{bmatrix} \quad (14)$$

$$B_1 = \begin{bmatrix} \underbrace{0 \dots 0}_{n_1=4} & K_1(1-\alpha) & K_1(1-\alpha) & \underbrace{0 \dots 0}_{n_2=4} \end{bmatrix}^T \quad (15)$$

$$B_2 = \begin{bmatrix} \underbrace{0 \dots 0}_{n=6} & K_2(1-\alpha) & K_2(1-\alpha) & 0 & 0 \end{bmatrix}^T \quad (16)$$

$$B_3 = \begin{bmatrix} \underbrace{0 \dots 0}_{n=8} & K_3(1-\alpha) & K_3(1-\alpha) \end{bmatrix}^T \quad (17)$$

$$C = [1 \quad \underbrace{0 \dots 0}_{n=9}] \quad (18)$$

$$F = [-\frac{1}{2H} \quad \underbrace{0 \dots 0}_{n=9}] \quad (19)$$

线性离散系统的状态空间模型的增量型表达式为:

$$\begin{cases} \Delta x(k+1) = \bar{A} \Delta x(k) + \sum_{i=1}^{N_{PV}} \bar{B}_i \Delta u_i(k) + \bar{F} \Delta w(k) \\ y(k) = C \Delta x(k) \end{cases} \quad (20)$$

式中:  $\Delta x(k)$  为  $k$  时刻的系统状态的变化量;  $\Delta x(k+1)$  为  $k+1$  时刻的系统状态的变化量;  $\Delta u_i(k)$  为  $k$  时刻的第  $i$  个控制器的输入变化量;  $\Delta w(k)$  为  $k$  时刻的扰动变化量;  $\bar{A} = e^{A^T} \bar{B}_i = \int_0^T e^{As} B_i ds$ ,  $\bar{F} = \int_0^T e^{As} F ds$ ;  $T$  为采样周期。

令  $V(k) = (\Delta x(k), y(k-1))^T$ , 结合式 (20) 得到系统的离散扩展状态空间模型:

$$\begin{cases} V(k+1) = A_E V(k) + \sum_{i=1}^{N_{pv}} B_{iE} \Delta u_i(k) + F_E \Delta w(k) \\ Y(k) = C_E V(k) \end{cases} \quad (21)$$

式中:  $A_E = \begin{pmatrix} A & 0_{N_x \times 1} \\ C & I \end{pmatrix}_{(N_x+1) \times (N_x+1)}$ ;  $B_{iE} = \begin{pmatrix} \bar{B}_i \\ 0 \end{pmatrix}_{(N_x+1) \times 1}$ ;  $F_E = \begin{pmatrix} \bar{F} \\ 0 \end{pmatrix}_{(N_x+1) \times 1}$ ;  $C_E = (C \ I)_{1 \times (N_x+1)}$ ,  $N_x$  为系统

控制矩阵  $A$  的阶数。

由式 (21) 可以得到  $k$  时刻预测系统  $k+t$  时刻的输出  $\tilde{y}(k+t|k)$  为:

$$\tilde{y}(k+t|k) = S'_{vy} v(k) + \sum_{i=1}^{N_{pv}} S'_{u_i y} \Delta u_i(k) + S'_{wy} \Delta w(k) \quad (22)$$

式中:  $S'_{vy} = C_E A_E^t$ ,  $S'_{u_i y} = \sum_{j=1}^t C_E A_E^{t-j} B_{iE}$ ;  $S'_{wy} = \sum_{j=1}^t C_E A_E^{t-j} F_E$ ,  $t \in [1, N_P]$ ;  $N_P$  为预测时域;  $N_C$  为控制时域, 且有  $\Delta u_i(k+t-1) = 0, \forall t > N_C$ 。

在时间  $k$  处推导出预测模型为:

$$Y(k+1) = S_{vy} V(k) + \sum_{i=1}^{N_{pv}} S_{u_i y} \Delta U_i(k) + S_{wy} \Delta W(k) \quad (23)$$

其中:

$$Y(k+1) = \begin{bmatrix} \tilde{y}(k+1|k)^T & \tilde{y}(k+2|k)^T & \cdots & \tilde{y}(k+N_P|k)^T \end{bmatrix}^T \quad (24)$$

$$\Delta U_i(k) = [\Delta u_i(k|k) \quad \cdots \quad \Delta u_i(k+N_C-1|k)]^T \quad (25)$$

$$\Delta W(k) = [\Delta w(k|k) \quad \cdots \quad \Delta w(k+N_P-1|k)]^T \quad (26)$$

$$S_{vy} = [S_{vy}^1 \quad S_{vy}^2 \quad \cdots \quad S_{vy}^{N_P}]^T \quad (27)$$

$$S_{u_i y} = \begin{bmatrix} S_{u_i y}^1 & 0 & \cdots & 0 \\ S_{u_i y}^2 & S_{u_i y}^1 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ S_{u_i y}^{N_P} & S_{u_i y}^{N_P-1} & \cdots & S_{u_i y}^{N_P-N_C} \end{bmatrix} \quad (28)$$

$$S_{wy} = \begin{bmatrix} S_{wy}^1 & 0 & \cdots & 0 \\ S_{wy}^2 & S_{wy}^1 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ S_{wy}^{N_P} & S_{wy}^{N_P-1} & \cdots & S_{wy}^2 \end{bmatrix} \quad (29)$$

根据上述公式, 可以求出系统的未来输出  $Y(k+1)$ 。

## 2.2 滚动优化

最优控制目标函数表示为:

$$\min_U J(\Delta U_i(k)) = \Delta U(k)^T H \Delta U(k) + S(k) \Delta U(k) \quad (30)$$

其中,

$$S(k) = 2 \sum_{i=1}^{N_{pv}} S_{u_i y}^T Q (S_{vy} V(k) + S_{wy} \Delta W(k)) \quad (31)$$

$$H = S_{vy}^T Q S_{vy} + R \quad (32)$$

$$Q = \text{diag}\{q_1, q_2, \cdots, q_{N_P}\} \quad (33)$$

$$R = \text{diag}\{r_1, r_2, \cdots, r_{N_C}\} \quad (34)$$

通过对上式求解, 得到最优控制增量序列  $\Delta U^*(k)$  为:

$$\Delta U^*(k) = \begin{bmatrix} \Delta u(k|k)^T \Delta u(k+1|k)^T \cdots \Delta u(k+N_C-1|k)^T \end{bmatrix}^T \quad (35)$$

## 2.3 反馈校正

为了减小低精度模型或环境扰动引起的控制系统对输出预测的偏离, 需要进行反馈校正。在  $k$  时刻将控制序列中的第一个控制  $U_i(k)$  作用于分布式光伏集群后, 可测得  $k+1$  时刻频率响应模型的实际输出为  $Y(k+1)$ 。根据在  $k$  时刻对系统输出  $k+1$  时刻的预测值  $\tilde{Y}(k+1|k)$ , 用实际输出和预测输出的误差加权来校正下个时刻的输出预测, 即:

$$Y(k+1+j|k+1) = \tilde{Y}(k+1+j|k) + h [Y(k+1) - \tilde{Y}(k+1|k)] \quad (36)$$

式中:  $h$  为误差校正加权矩阵;  $Y(k+1+j|k+1)$  为校正后的系统输出预测值。

### 3 仿真结果与分析

在 MATLAB 中建立上述负荷频率控制仿真模型, 模型参数参考文献[27-28], 具体智能电网的参数设置如下:  $T_r=0.3$ ,  $T_g=0.08$ ,  $H=6$ ,  $D=1$ ,  $R=0.05$ ,  $K=1$ 。

#### 3.1 不同集群划分结果仿真分析

采用 FSC 算法对分布式光伏单元进行聚类分群, 取不同的聚类数, 计算得到的 RI(随机指数)和 NMI(归一化互信息指标)值如表 2 所示。

表 2 集群划分效果评价指标

Table 2 Evaluation indicators of cluster segmentation

$c$	RI	NMI
1	0.602 1	0.000 0
2	0.626 3	0.294 1
3	0.779 5	0.668 3

由表 2 可知: 当分群数  $c$  为 3 时, 聚类评价指标的 RI 值和 NMI 值都最大, 宜将分布式光伏单元分为 3 个集群。

为了进一步验证表 2 的聚类划分效果评价, 建立分布式光伏集群等值模型, 不同聚类结果的多机等值模型和单机等值模型下分布式光伏集群系统的功率响应曲线如图 2 所示。

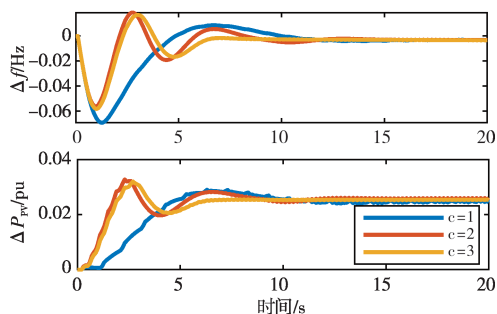


图 2 不同集群划分结果下的系统动态响应对比

Fig.2 Comparison of dynamic response under different cluster segmentations

如图 2 所示, 采用大小为 0.025 p.u. 的阶跃负荷作为扰动, 系统频率响应模型运行状态发生变化时, 单机等值模型功率响应和系统频率的误差较大, 而采用聚类等值法建立的多机等值模型具有相似的功率响应和系统频率误差。这是由于分布式光伏集群多机模型的动态响应是所有分布式

光伏单元动态响应的叠加, 通过聚类分群可以将动态特性相近的发电单元划分到一起进行等值, 从而更好地拟合实际模型的动态响应过程。其中聚类中心数为 3 时, 系统的频率响应稳定时间相对与聚类中心数为 2 时更短, 频率恢复速度更快。结合表 2 的集群划分效果评价指标, 说明采用 FSC 方法建立的多机等值模型可以让分布式光伏单元更好地参与系统调频。

#### 3.2 不同通信延时场景仿真分析

针对系统存在通信延时的情况, 评估了本文所提控制策略对系统频率稳定的影响。同样采用大小为 0.025 p.u. 的阶跃负荷作为扰动, 测试通信延时对系统产生的影响。引入不同的通信延时值  $\tau$ , 动态性能如图 3 所示。随着延时的增加, 频率偏差也在明显变大。通信延迟对电力系统的频率响应产生负面影响, 可以看出, 延时较大时, 电力系统性能逐渐恶化, 但在本文所提控制策略下, 系统频率偏差仍保持在一定范围内, 且能保证系统在较短时间内恢复稳定, 表明所提出的控制策略具有优势。

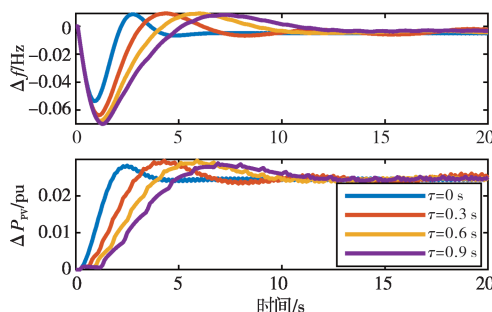


图 3 不同通信延时下的系统动态响应对比

Fig.3 Comparison of dynamic response under different communication delays

#### 3.3 阶跃负荷扰动场景仿真分析

##### 3.3.1 阶跃负荷扰动场景下不同控制策略仿真分析

随着越来越多的新能源接入电力系统, 电力系统出现低惯量特性, 这容易导致频率稳定性问题, 影响系统频率调节效果。因此, 为了验证所提频率控制方法的鲁棒性和延迟补偿策略的有效性, 同样采用大小为 0.025 p.u. 的阶跃负荷作为扰动, 使用 3 种不同的控制方法: 不对分布式光伏集群进行控制的方法作为方法 1; 一般 MPC 方法作为方法 2; 本文所提的 EMPC 控制策略称为

方法3。

图4是在阶跃负荷扰动场景下不同控制方法的系统动态响应对比,由图4可知:在短时连续负荷扰动下,方法1影响下的系统频率波动幅值最大,方法3的频率下降最小;方法2影响下的分布式光伏集群出力维持效果更稳定,但存在一定频率稳态误差,超调量较方法3也更大。可见本文所提策略在稳态控制性能、鲁棒性上均具有优势。

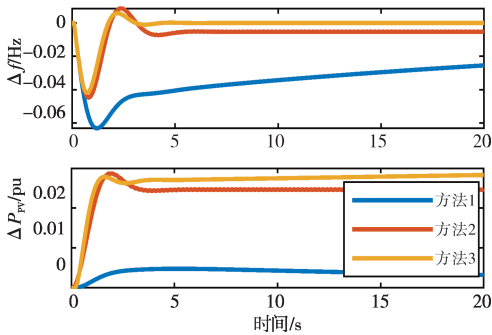


图4 阶跃负荷扰动场景下的系统动态响应对比

Fig.4 Comparison of dynamic response under step load disturbance

### 3.3.2 不同阶跃负荷扰动场景仿真分析

为了进一步分析所提控制方法的有效性,将不同的阶跃负荷扰动应用于同样的惯性减小10%的系统。在这种情况下,假设阶跃变化分别等于0.025 p.u.、0.05 p.u.、0.075 p.u.和0.1 p.u.。比较结果如图5所示,可以看出在EMPC控制策略下,即使扰动增大,系统仍然能够保持稳定,不会振荡和发散。在使用补偿方法的情况下,所提出的协调控制策略具有良好的性能,有助于消除通信延迟造成的不利影响。

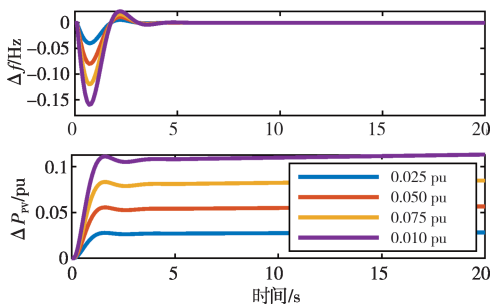


图5 不同负载扰动场景下的系统动态响应对比

Fig.5 Comparison of dynamic response under different load disturbance

## 4 结论

本文主要研究了分布式光伏的集群划分和有功协调控制问题。在集群划分方面,首先基于光伏逆变器的控制参数和外部环境参数作为集群划分指标,应用模糊子空间聚类算法将大规模分布式光伏单元划分成分布式光伏集群。在有功协调控制方面,提出一种基于EMPC的分布式光伏集群协调控制方法;最后,利用MATLAB进行仿真验证,得出以下结论:

1)采用FSC算法可以有效分析处理各集群可调节容量和频率调节速度的高维分布式光伏聚类指标,提高计算效率和聚类结果的准确性,实现分布式光伏最大程度参与辅助调频。

2)本文所提EMPC方法对分布式光伏集群参与调频有优化作用,在存在通信延时工况和阶跃负荷扰动工况下调频误差小,调频效果好,为分布式光伏集群参与调频设计控制策略提供参考。

## 参考文献

- [1] 游大宁,刘航航,鲍冠南,等.源网荷储多元协同调度体系研究与实践[J].浙江电力,2021,40(12):20-26.  
YOU Daning, LIU Hanghang, BAO Guannan, et al. Research and practice on the multiple collaborative scheduling system of source-grid-load-storage [J]. Zhejiang Electric Power, 2021, 40(12): 20-26.
- [2] LI S N, LI X, HO S H. Microalgae as a solution of third world energy crisis for biofuels production from wastewater toward carbon neutrality: an updated review [J]. Chemosphere, 2022, 291: 132863.
- [3] 梁伟豪,周潮,涂智豪,等.分布式光伏接入对配电网可靠性影响的快速评估方法[J].供用电,2020,37(2):60-66.  
LIANG Weihao, ZHOU Chao, TU Zhihao, et al. Rapid evaluation method of the influence of distributed photovoltaic access on distribution network reliability [J]. Distribution & Utilization, 2020, 37(2): 60-66.
- [4] 胡雪凯,尹瑞,时珉,等.基于改进粒子群算法的分布式光伏集群划分与无功优化策略[J].电力电容器与无功补偿,2021,42(4):14-21.  
HU Xuekai, YIN Rui, SHI Min, et al. Distributed photovoltaic cluster partition and reactive power optimization strategy based on improved particle swarm optimization algorithm [J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2021, 42(4): 14-21.
- [5] 时珉,尹瑞,姜卫同,等.分布式光伏灵活并网集群调控技

- 术综述[J].电测与仪表,2021,58(12):1-9.  
SHI Min, YIN Rui, JIANG Weitong, et al. Overview of flexible grid-connected cluster control technology for distributed photovoltaic[J].Electrical Measurement & Instrumentation,2021,58(12):1-9.
- [6] 孙一凡,张蕾琼,刘达.农村地区分布式光伏接入消纳能力研究[J].浙江电力,2017,36(11):45-50.  
SUN Yifan, ZHANG Leiqiong, LIU Da. Research on the consumption capability of distributed photovoltaic access in rural areas[J].Zhejiang Electric Power, 2017, 36(11): 45-50.
- [7] 时珉,尹瑞,姜卫同,等.分布式光伏灵活并网集群调控技术综述[J].电测与仪表,2021,58(12):1-9.  
SHI Min, YIN Rui, JIANG Weitong, et al. Overview of flexible grid-connected cluster control technology for distributed photovoltaic[J].Electrical Measurement & Instrumentation,2021,58(12):1-9.
- [8] WU Y N, XU M J, TAO Y, et al. A critical barrier analysis framework to the development of rural distributed PV in China[J].Energy, 2022, 245: 123277.
- [9] 刘科研,盛万兴,马晓晨,等.基于多种群遗传算法的分布式光伏接入配电网规划研究[J].太阳能学报,2021,42(6):146-155.  
LIU Keyan, SHENG Wanxing, MA Xiaochen, et al. Planning research of distributed photovoltaic source access distribution network based on multi-population genetic algorithm [J]. Acta Energiæ Solaris Sinica, 2021, 42(6): 146-155.
- [10] 贺国伟,肖峻,曹加胜.考虑分布式光伏消纳的大型城市配电网规划实践[J].供用电,2021,38(10):26-34.  
HE Guowei, XIAO Jun, CAO Jiasheng. Planning practice of large urban distribution network considering distributed photovoltaic consumption [J]. Distribution & Utilization, 2021, 38(10): 26-34.
- [11] 丁明,王伟胜,王秀丽,等.大规模光伏发电对电力系统影响综述[J].中国电机工程学报,2014,34(1):1-14.  
DING Ming, WANG Weisheng, WANG Xiuli, et al. A review on the effect of large-scale PV generation on power systems[J].Proceedings of the CSEE, 2014, 34(1): 1-14.
- [12] 李鹏,于航,夏曼,等.分布式光伏集群分层多模式无功控制策略[J].电网技术,2016,40(10):3038-3044.  
LI Peng, YU Hang, XIA Man, et al. A hierarchical multi-mode var control strategy for grid-connected PV clusters [J].Power System Technology, 2016, 40(10): 3038-3044.
- [13] WANG Y N, ZHU X R, WANG Y. Large-scale photovoltaic power station reliability model and energy-yield sensitivity analysis[C]//2015 18th International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS). October 25-28, 2015, Pattaya, Thailand: IEEE, 2016: 1655-1659.
- [14] 焦田利,章坚民,李熊,等.基于空间相关性的大规模分布式用户光伏空间分群方法[J].电力系统自动化,2019,43(21):97-102.  
JIAO Tianli, ZHANG Jianmin, LI Xiong, et al. Spatial clustering method for large-scale distributed user photovoltaics based on spatial correlation [J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(21): 97-102.
- [15] MUKHERJEE S, CHOWDHURY V R, SHAMSI P, et al. Model reference adaptive control based estimation of equivalent resistance and reactance in grid-connected inverters [J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2017, 32(4): 1407-1417.
- [16] LI P X, GU W, WANG L F, et al. Dynamic equivalent modeling of two-staged photovoltaic power station clusters based on dynamic affinity propagation clustering algorithm [J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2018, 95: 463-475.
- [17] LV N J, LIU X T, HU J J, et al. Cluster partition method development for high penetration of distributed photovoltaics using intelligent algorithm and K-means [C]//2022 IEEE 5th International Conference on Electronics Technology (ICET). May 13-16, 2022, Chengdu, China: IEEE, 2022: 1255-1260.
- [18] 胡雪凯,尹瑞,时珉,等.基于改进粒子群算法的分布式光伏集群划分与无功优化策略[J].电力电容器与无功补偿,2021,42(4):14-21.  
HU Xuekai, YIN Rui, SHI Min, et al. Distributed photovoltaic cluster partition and reactive power optimization strategy based on improved particle swarm optimization algorithm [J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2021, 42(4): 14-21.
- [19] 张永新,李飞,张榴晨,等.基于线路阻抗聚类的分布式光伏电站等效建模[J].太阳能学报,2022,43(5):312-318.  
ZHANG Yongxin, LI Fei, ZHANG Liuchen, et al. Equivalent modeling of distributed photovoltaic power station based on line impedance clustering [J]. Acta Energiæ Solaris Sinica, 2022, 43(5): 312-318.
- [20] 郭易鑫,韩霞,倪光捷,等.基于改进Canopy-FCM的光伏电站动态特性聚类算法[J].计算机应用与软件,2022,39(4):287-293.  
GUO Yixin, HAN Xia, NI Guangjie, et al. A clustering analysis algorithm of dynamic characteristics of photovoltaic power plant based on improved canopy fuzzy c-means [J]. Computer Applications and Software, 2022, 39(4): 287-293.
- [21] 周宇星.分布式光伏微电站布局及集群控制优化研究[D].哈尔滨:哈尔滨理工大学,2018.  
ZHOU Yuxing. Research on layout and cluster control optimization of distributed photovoltaic micro-power station

- [D]. Harbin: Harbin University of Science and Technology, 2018.
- [22] 张从越, 窦晓波, 盛万兴, 等. 分布式光伏集群鲁棒虚拟同步化控制方法[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(2): 510-522.  
ZHANG Congyue, DOU Xiaobo, SHENG Wanxing, et al. A robust virtual synchronization control strategy for distributed photovoltaic clusters [J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(2): 510-522.
- [23] 刘刚, 陈海东, 孙睿哲, 等. 集群光伏电站频率主动支撑自校正控制方法[J]. 中国电力, 2022, 55(9): 156-162.  
LIU Gang, CHEN Haidong, SUN Ruizhe, et al. Self-tuning control method for frequency active support of cluster photovoltaic power station [J]. Electric Power, 2022, 55(9): 156-162.
- [24] 郑小宇, 季宇, 张颖, 等. 基于模型预测控制的分布式光伏集群协调优化控制[J]. 电网与清洁能源, 2019, 35(7): 66-74.  
ZHENG Xiaoyu, JI Yu, ZHANG Ying, et al. Coordinated optimal control of distributed photovoltaic cluster based on model predictive control [J]. Power System and Clean Energy, 2019, 35(7): 66-74.
- [25] 张恒巍, 何嘉婧, 韩继红, 等. 基于智能优化算法的模糊软子空间聚类方法[J]. 计算机科学, 2016, 43(3): 256-261.  
ZHANG Hengwei, HE Jiaping, HAN Jihong, et al. Fuzzy soft subspace clustering method based on intelligent optimization algorithm [J]. Computer Science, 2016, 43(3): 256-261.
- [26] ABD-ELAZIM S M, ALI E S. Load frequency controller design of a two-area system composing of PV grid and thermal generator via firefly algorithm [J]. Neural Computing and Applications, 2018, 30(2): 607-616.
- [27] ZHAO N, GORBACHEV S, YUE D, et al. Model predictive based frequency control of power system incorporating air-conditioning loads with communication delay [J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2022, 138: 107856.
- [28] YANG Z C, YANG F, HU W, et al. Delay compensation control strategy for electric vehicle participating in frequency regulation based on MPC algorithm [J]. Electronics, 2022, 11(15): 2341.

---

收稿日期: 2023-01-17; 修回日期: 2023-02-22

作者简介:

魏万俊(1980), 男, 工学学士, 工程师, 研究方向为电力系统工程。

(本文编辑: 童 凯)