DOI：10.13234/j.issn.2095-2805.2026.2.178 **中图分类号**：TM743 **文献标志码**：A

含虚拟电厂的互联电力系统负荷频率预测控制

何家乐[1](中国电源学会会员)，姜 超[1]，孙正龙[1]，YOASH Levron[2]
(1.东北电力大学现代电力系统仿真控制与绿色电能新技术教育部重点实验室，吉林 132012；
2.以色列理工学院电气工程系，海法 3200003)

摘要：虚拟电厂VPP(virtual power plant)旨在将容量小、数量大的分布式电源DGs(distributed generations)聚合利用。构建了聚合储能、电动汽车及风机的VPP分段参与火电机组二次调频的负荷频率控制LFC(load frequency control)模型，提出1种包含VPP的集中式自动发电控制策略。解析了虚拟电厂聚合资源的调频模型，考虑各调频环节的约束限制，以最低调频成本及区域控制偏差最小为目标，利用模型预测控制优化分配虚拟电厂内部DGs的功率输出。利用MATLAB/Simulink对所提2区域电力系统的LFC模型进行仿真，比较在虚拟电厂参与系统调频前后的频率误差及联络线功率偏差，仿真结果表明，虚拟电厂参与下多区域LFC可以减轻功率波动所带来的频率扰动及联络线功率偏差，所提控制策略能够实现有功出力优化分配，相较于传统PID调节具有更好的控制效果。

关键词：虚拟电厂；负荷频率控制；分布式电源；模型预测控制

Load Frequency Predictive Control of Interconnected Power System with Virtual Power Plant

HE Jiale[1], *Member*, *CPSS*, JIANG Chao[1], SUN Zhenglong[1], YOASH Levron[2]
(1. Key Laboratory of Modern Power System Simulation and Control & Renewable Energy Technology, Ministry of Education(Northeast Electric Power University), Jilin 132012, China; 2. The Andrew and Erna Viterbi Faculty of Electrical Engineering, Technion(Israel Institute of Technology), Haifa 3200003, Israel)

Abstract: The goal of avirtual power plant (VPP) is to aggregate and use a large number of distributed generations (DGs) with tiny capacities. A load frequency control (LFC) model for the secondary frequency regulation of thermal power units is constructed with the time-segmented participation of a VPP that aggregates energy storage, electric vehicles and wind turbines, and a kind of centralized automatic generation control strategy with VPP is proposed. The frequency modulation model for aggregated resources in the VPP is analyzed, the constraints on each frequency modulation link are taken into account, and the minimization of frequency modulation costs and area control erroris taken as an objective. Meanwhile, model predictive control is used to optimize the allocation of power output from DGs within the VPP. The proposed LFC model for a two-region power system is simulated using MATLAB/Simulink, and the frequency error and power deviation of the tie line are compared before and after the VPP takes part in the system frequency modulation. According to the simulation results, it is found that the multi-region LFC with participation of VPP can reduce frequency disturbances and power deviation of the tie line brought by power fluctuations, and the proposed control strategy can achieve the optimal allocation of active output. Comparison with the conventional PID regulation, this strategy also has better control outcomes.

Keywords: Virtual power plant (VPP); load frequency control (LFC); distributed generation (DG); model predictive control

收稿日期：2023-04-06；**修回日期**：2023-05-27；**录用日期**：2023-07-17；**网络首发日期**：2023-10-24
基金项目：吉林省国际科技合作资助项目(20230402074GH)
This work is supported by International Science and Technology Cooperation Project of Jilin Province under the grant 20230402074GH

随着清洁可再生能源及分布式电源DG(distributed generation)大规模并入电网，在面对负荷功率波动时，电网频率的稳定性面临较大挑战[1]，多区域间自动发电控制AGC(automatic generation

control)可实现对发电出力实时调节，保证发电出力与负荷平衡，保证系统频率在规定区间内[2]。从环保角度看，聚合大量 DGs 参与自动发电控制对减少电力系统碳排放具有重要意义，考虑到地理位置及单机容量限制需要对它们聚合管理，虚拟电厂 VPP(virtual power plant)的提出为解决问题提供了新思路[3]：虚拟电厂由若干新能源系统及分布式可控负荷组成，与传统火电机组配合可在电力市场中为电网提供调频的辅助及管理服务，多种 DGs 相结合可以协同增效，提高系统的稳定性与经济效益。

在电网中，目前有关虚拟电厂参与调频的研究大多是其参与调频辅助服务的研究[4-6]。文献[4]将虚拟电厂中的发电单元划分为正、负及储能 3 种电源，提出了根据资源调节特性差异的响应策略；文献[5]利用电动汽车参与 AGC 调频，建立了包含电动汽车、储能及火电的调频决策模型，采用经验模态分解法对系统频率波动进行分解，根据各个环节的响应特性进行功率分配，优化 AGC 调频效果；文献[6]考虑到电力系统中非线性建模难以适用于优化电力市场中投标，提出了 1 种基于线性回归的频率调节及市场优化建模。以上研究结合日内调度问题，在长时间尺度下利用 VPP 参与调频服务，满足市场经济性要求，但只关注虚拟电厂参与电力市场的调频调度策略，没有建立 VPP 参与 AGC 的调频模型。文献[7]提出了包含热电站、光伏系统及储能系统的 VPP 模型，基于模型预测控制 MPC(model predictive control)的方法，对 VPP 内部发电出力进行管理分配；文献[8]构建了聚合风能、潮汐能及太阳能的虚拟电厂，解析各个环节的调频模型并分析不同的可再生能源波动对系统频率的影响。上述研究只关注单区域下 VPP 参与调频的问题，没有考虑利用 AGC 信号作用于互联电力系统。

多区域电力系统是以电力市场经济性和负荷分布情况为前提，对电力系统进行区域划分，并通过输电线将多个区域连接起来的系统[9]。多区域互联电力系统之间发电出力可以相互协调，在此基础上对其中发电资源进行聚合、管理及协调，使系统具备经济性与稳定性。针对以上问题，本文搭建了计及 VPP 的多区域负荷频率控制 LFC(load frequency control)模型，提出 1 种集中式自动发电控制策略：利用 MPC 协调 VPP 内部 DG 的线性化模型发电功率，并根据各种分布式电源(风电、储能及电动汽车)的特性，实现 DGs 分段并网，参与电力系统的 LFC。所提模型在上述策略下能够实现 DG 功率的短期预测控制，提升多区域电力系统在面对功率扰动时的区域控制偏差 ACE(area control error)调整能力与调频经济性。

1　虚拟电厂建模

1.1　虚拟电厂结构

VPP 可灵活调度快速反应资源，其由储能、发电系统及通信系统构成。受控的发电系统包括 DG、可控负荷及电动汽车，其中发电计划的分配依赖于软件与信息通信系统[10]。在本文的集中式控制策略下，MPC 优化控制器位于 VPP 的控制中心，能量管理系统接收前一时刻虚拟电厂中的状态参数并根据 ACE 控制效果对控制信号进行预测，更新信号并优化分配各环节出力情况。VPP 根据发电计划参与市场竞标，得到输电系统操作员 TSO 确认后与传统火电厂一起加入电力市场。本文 VPP 聚合风储系统及电动汽车集群，在参与系统调频时，受 MPC 控制器集中式控制。

1.2　风储系统调频模型

MPC 方法可以对风机桨距角 β 进行有效地预测控制，从而调节风机输出功率。采用桨距角控制时，风机模型呈现非线性及不确定性，风电参与电力系统时需要考虑如风速等其他因素的影响。一般风机的空气动力系统的表达式见文献[11]。在定风速与保持最佳叶尖速比的条件下，可以通过改变桨距角开度大小实现对风机输出功率的调整。风机输出功率 ΔP_{wind} 的传递函数表达式为

$$\Delta P_{\mathrm{wind}} = \Delta\beta G_{\mathrm{wind}} = \Delta\beta \frac{k_\beta}{1+T_{\mathrm{wind}}s} \tag{1}$$

式中：$\Delta\beta$ 为桨距角角度变化量；G_{wind} 为风机功率传递函数；T_{wind} 为风机响应时间；k_β 为桨距角控制斜率。

对风机输出功率 ΔP_{wind} 与桨距角之间的关系通过 MATLAB 进行线性拟合(风速 6 m/s)，利用斜率 k_β 对风机功率模拟控制，结果如图 1 所示。

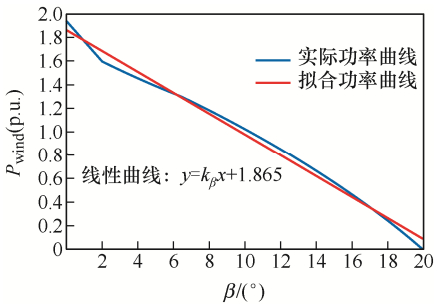


图 1 输出功率与桨距角 β 函数拟合

Fig. 1 Function fitting of output power and pitch angle β

单独采用桨距角控制风机的输出功率时，没有虚拟惯量的支持，桨距角较长的响应时间会导致风机的调频能力下降，参与系统调频时，需联合具有快速响应能力的储能系统抑制功率波动[12]。储能系统响应时间短，瞬时功率吞吐能力强，短时间内可以达到功率的满输出，储能系统功率 ΔP_{bess} 传递函数表达式为

$$\Delta P_{\text{bess}} = \Delta P_{\text{s}} G_{\text{bess}} = \Delta P_{\text{s}} \frac{1}{1+T_{\text{bess}}s} \tag{2}$$

式中：ΔP_{s} 为储能瞬时功率；G_{bess} 为储能系统传递函数；T_{bess} 为储能系统响应时间。电池荷电状态 SOC(state of charge)随储能电池充放电的过程时时改变，在不考虑充放电效率的情况下，k 时刻荷电状态 SOC 表达式为

$$S_{\text{OC}}(k) = S_{\text{OC}}(k-1) - \Delta P_{\text{bess}} \frac{T}{E_{\text{bess}}} \tag{3}$$

式中：T 为 MPC 下的采样离散时间；E_{bess} 为储能系统总容量。

1.3 电动汽车调频模型

电动汽车内置储能电池作为 1 种柔性调控资源，其充电与放电的工作过程对电网而言可分别视为负荷和电源[13-15]。在短时调频尺度下，某区域的电动汽车集群以固定数量的整体形式进行功率输出，输入信号 ΔU_{ev} 控制下的电动汽车集群功率变化量[16]可表示为

$$\Delta P_{\text{ev}} = \Delta U_{\text{ev}} G_{\text{ev}} = \Delta U_{\text{ev}} \frac{1}{1+T_{\text{ev}}s} \tag{4}$$

式中：G_{ev} 为电动汽车集群储能系统传递函数；T_{ev} 为电动汽车集群储能系统响应时间。在汽车数量固定的前提下，ΔU_{ev} 的大小代表电动汽车电池充放电深度的高低。

为保证电动汽车用户自身电池余量，多区域系统发生功率扰动时，在电动汽车集群并网区域设定调频死区$[-f_{\text{d}}, f_{\text{d}}]$。当该区域频率偏差位于调频死区时，电动汽车集群不参与系统调频；当该区域频率偏差值超出所设定的调频区间时，电动汽车集群接收 AGC 信号控制，参与到系统 LFC。分段调频策略可避免对电动汽车频繁调用，保障用户电池的寿命。当 $\Delta P_{\text{ev}}>0$ 时，电动汽车向电网放电；当 $\Delta P_{\text{ev}}<0$ 时，电动汽车从电网吸收电能。电动汽车集群的输出功率 ΔP_{e} 为

$$\Delta P_{\text{e}} = \begin{cases} 0 & -f_{\text{d}} \leqslant \Delta f_i \leqslant f_{\text{d}} \\ \dfrac{\Delta U_{\text{ev}}}{1+T_{\text{ev}}s} & \Delta f_i > f_{\text{d}}, \Delta f_i < -f_{\text{d}} \\ P_{\text{ev,max}} & \dfrac{\Delta U_{\text{ev}}}{1+T_{\text{ev}}s} > P_{\text{ev,max}} \\ -P_{\text{ev,max}} & \dfrac{\Delta U_{\text{ev}}}{1+T_{\text{ev}}s} < -P_{\text{ev,max}} \end{cases} \tag{5}$$

式中：Δf_i 为 i 区域系统频率变化；$P_{\text{ev,max}}$ 为电动汽车集群最大充放电功率，与单个电动汽车电池额定容量及集群中电动汽车总数相关。本文着重于短时尺度下集群整体的调频效果，对内部电池 SOC 的变化不进行讨论。当输出功率变化量超出电动汽车集群容量限制时，按集群的最大充放电能力进行调控，电动汽车参与调频时还需考虑功率增量的爬坡约束，避免功率波动过快对电动汽车电池寿命的影响。

2 含虚拟电厂的负荷频率预测控制模型

虚拟电厂以参与者的身份加入 LFC 中，在

AGC 信号控制下参与电力系统的调频工作。MPC 可以实现对 VPP 内 DGs 输入变量的预测控制，从而改变 VPP 整体功率输出。图 2 为聚合多种分布式电源的 VPP 参与单区域 LFC 框图。

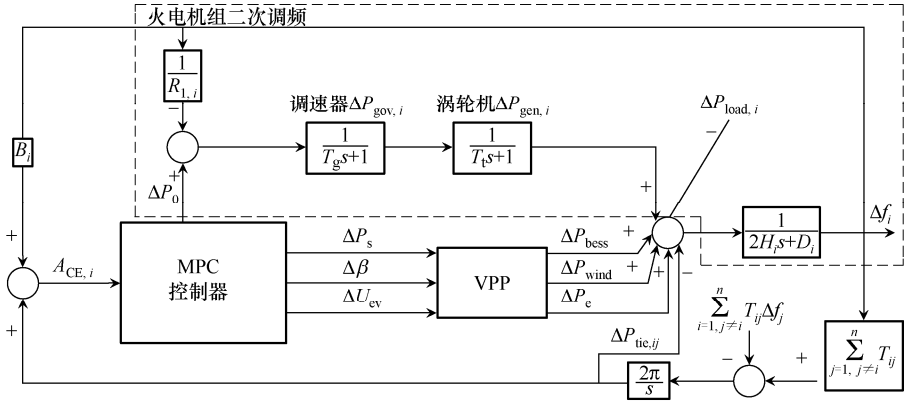


图 2　虚拟电厂参与下单区域 LFC

Fig. 2 LFC in one area with VPP participation

电力系统的频率变化取决于有功功率的平衡状态，在发生负荷扰动和新能源接入导致的功率波动时，系统频率变化表示为

$$\Delta f_i = (\Delta P_{\text{fm},i} - \Delta P_{\text{load},i} - \Delta P_{\text{tie},ij})\frac{1}{2H_i s + D_i} \tag{6}$$

$$\Delta P_{\text{fm},i} = \Delta P_{\text{gen},i} + \Delta P_{\text{wind},i} + \Delta P_{\text{bess},i} + \Delta P_{\text{e},i} \tag{7}$$

式中：$\Delta P_{\text{fm},i}$ 为 i 区域调频系统总功率变化量，包含火电机组及虚拟电厂；$\Delta P_{\text{load},i}$ 为 i 区域负荷扰动；$\Delta P_{\text{tie},ij}$ 为 i、j 区域间联络线传输功率偏差；H_i 为 i 区域电网惯性时间常数；D_i 为 i 区域负荷调节常数；$\Delta P_{\text{gen},i}$、$\Delta P_{\text{wind},i}$、$\Delta P_{\text{bess},i}$、$\Delta P_{\text{e},i}$ 分别为 i 区域火电机组、风电机组、储能系统、电动汽车集群出力变化量。

系统 i 区域的区域控制偏差 $A_{\text{CE},i}$，i 区域频率响应系数 B_i 和 i、j 区域间联络线传输功率偏差 $\Delta P_{\text{tie},ij}$ 分别表示为

$$A_{\text{CE},i} = \Delta P_{ij} + B_i \Delta f_i \tag{8}$$

$$B_i = \sum_{g=1}^{n} \frac{1}{r_{g,i}} + D_i \tag{9}$$

$$\Delta P_{\text{tie},ij} = \frac{2\pi}{s} T_{ij}(\Delta f_i - \Delta f_j) \tag{10}$$

式中：ΔP_{ij} 为 i、j 区域间功率偏差；$r_{g,i}$ 为 i 区域中第 g 个环节的一次调频下降率；T_{ij} 为 i、j 区域间同步系数。

LFC 模型下，k 时刻下单区域线性化预测模型为

$$\begin{cases} \dot{x}(k) = \bar{\boldsymbol{A}}x(k) + \bar{\boldsymbol{B}}u(k) + \bar{\boldsymbol{W}}w(k) \\ y(k) = \boldsymbol{C}x(k) \end{cases} \tag{11}$$

式中：$x(k)$为状态变量；$u(k)$为预测控制变量；扰动变量 $w(k)$为 $\Delta P_{\text{load}}(k)$；输出变量 $y(k)$为 $A_{\text{CE},i}(k)$；$\boldsymbol{A}$、$\boldsymbol{B}$、$\boldsymbol{W}$、$\boldsymbol{C}$ 分别为 MPC 控制下各个调频环节的状态矩阵、控制矩阵、扰动矩阵及输出矩阵。模型中的状态空间方程及输出空间方程分别为

$$\begin{cases} x(k) = [\Delta P_{\text{gen}} \quad \Delta P_{\text{gov}} \quad \Delta f]^{\text{T}} \\ \boldsymbol{A} = \begin{bmatrix} -\dfrac{1}{T_{\text{t}}} & \dfrac{1}{T_{\text{t}}} & 0 \\ 0 & -\dfrac{1}{T_{\text{g}}} & -\dfrac{1}{T_{\text{g}}r} \\ \dfrac{1}{2H} & 0 & -\dfrac{D}{2H} \end{bmatrix} \\ u(k) = [\Delta P_0] \\ \boldsymbol{B} = [0 \quad \dfrac{1}{T_{\text{g}}} \quad 0]^{\text{T}} \end{cases} \tag{12}$$

$$\begin{cases} x(k) = [\Delta P_{\text{wind}} \quad \Delta f]^{\text{T}} \\ \boldsymbol{A} = \begin{bmatrix} -\dfrac{1}{T_{\text{wind}}} & 0 \\ \dfrac{1}{2H} & -\dfrac{D}{2H} \end{bmatrix} \\ u(k) = [\Delta\beta] \\ \boldsymbol{B} = \begin{bmatrix} \dfrac{k_\beta}{T_{\text{wind}}} & 0 \end{bmatrix}^{\text{T}} \end{cases} \tag{13}$$

$$\begin{cases} x(k)=[\Delta P_{\text{bess}} \quad \Delta f]^{\text{T}} \\ \boldsymbol{A}=\begin{bmatrix} -\dfrac{1}{T_{\text{bess}}} & 0 \\ \dfrac{1}{2H} & -\dfrac{D}{2H} \end{bmatrix} \\ u(k)=[\Delta P_{\text{s}}] \\ \boldsymbol{B}=\begin{bmatrix} \dfrac{1}{T_{\text{bess}}} & 0 \end{bmatrix}^{\text{T}} \end{cases} \tag{14}$$

$$\begin{cases} x(k)=[\Delta P_{\text{e}} \quad \Delta f]^{\text{T}} \\ \boldsymbol{A}=\begin{bmatrix} -\dfrac{1}{T_{\text{ev}}} & 0 \\ \dfrac{1}{2H} & -\dfrac{D}{2H} \end{bmatrix} \\ u(k)=[\Delta U_{\text{ev}}] \\ \boldsymbol{B}=\begin{bmatrix} \dfrac{1}{T_{\text{ev}}} & 0 \end{bmatrix}^{\text{T}} \end{cases} \tag{15}$$

$$\begin{cases} x(k)=[\Delta f_i \quad \Delta f_j \quad \Delta P_{\text{tie},ij}]^{\text{T}} \\ \boldsymbol{C}=\begin{bmatrix} B_i & 0 & 1 \\ B_j & 0 & -1 \end{bmatrix} \end{cases} \tag{16}$$

式中：ΔP_{gov} 为调速器位置变化量；T_{g} 为调速器响应时间；T_{t} 为汽轮机响应时间。

3 基于 MPC 的优化分配策略

3.1 MPC 控制策略

模型预测控制是在当前采样时刻 k 时，提取 $x(k)$、$u(k)$及 $w(k)$在设定的目标函数及约束条件下优化预测下一段时间序列最优控制变量$[u(k+1|k) \quad u(k+2|k) \quad \cdots \quad u(k+m|k) \quad \cdots \quad u(k+p|k)]^{\text{T}}$，选取窗口内第 1 个预测控制变量 $u_1(k)$作为下一时刻实际控制变量，并更新状态变量 $x(k)$的过程。依次类推，在 k 到 $k+p$ 时间窗口内采用滚动式的优化，利用求解器在不确定性线性建模中得到控制变量及输出变量的全局次优解[17]。该模型下 MPC 算法过程如图 3 所示。

该策略下，首先采用零阶保持器对系统模型式(11)离散化。k 时刻，扰动 $w(k)$发生，系统更新输出变量 $A_{\text{CE},i}(k)$。系统优化过程如图 4 所示，针对目标函数，在约束条件下，MPC 控制器预测

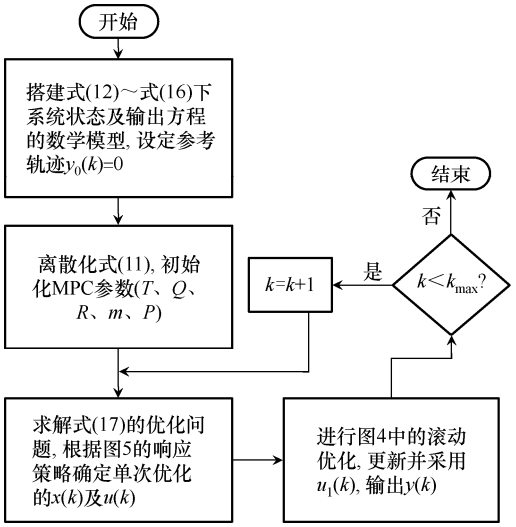


图 3 MPC 算法过程

Fig. 3 Flow chart of MPC algorithm

更新式(12)~式(16)中 VPP 风机桨距角开度 $\Delta\beta(k)$、储能系统瞬时功率输出 $\Delta P_{\text{s}}(k)$及电动汽车的控制输入 $\Delta U_{\text{ev}}(k)$，并采取控制序列中首位参数，优化分配本地系统中每个 DG 可做出的贡献，以消除功率扰动带来的 $A_{\text{CE},i}(k)$波动。其中，针对目标函数的寻优问题采用 Gurobi 优化求解器。单次滚动过程中，火电机组及风储系统作为常规调频单元首先参与电力系统的 LFC。为避免频繁调用汽车集群，按式(5)方式判断是否需要聚合其参与系统调频，确定单次优化过程下参与 LFC 的状态变量数目，并更新其数值，从而生成新的输出变量 $A_{\text{CE},i}(k+1)$，为下一次滚动优化做准备。

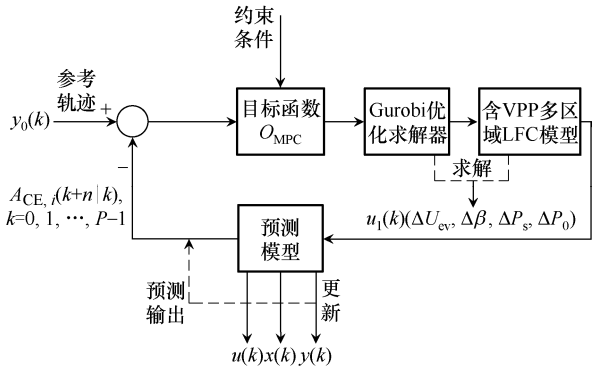


图 4 MPC 滚动优化过程

Fig. 4 Rolling optimization process of MPC

Δf_i作为状态变量之一，在 MPC 滚动优化下实时更新。图5 为单区域中的VPP 功率响应策略，

其中 P_a 为风储系统出力。当 $\Delta f_i \in [b, c]$时，VPP 中仅有风储联合系统参与系统调频，此时 VPP 控制变量 $\boldsymbol{u}_{\mathrm{VPP}} = [\Delta\beta \ \ \Delta P_s]^{\mathrm{T}}$，状态变量 $\boldsymbol{x}_{\mathrm{VPP}} = [\Delta P_{\mathrm{wind}} \ \Delta P_{\mathrm{wind}}]^{\mathrm{T}}$；当 $\Delta f_i \in [a, b] \cup [c, d]$时，VPP 中聚合电动汽车集群，控制变量及状态变量分别为$[\Delta\beta \ \ \Delta P_s \ \ \Delta U_{\mathrm{ev}}]^{\mathrm{T}}$、$[\Delta P_{\mathrm{wind}} \ \Delta P_{\mathrm{wind}} \ \Delta P_e]^{\mathrm{T}}$。当 $\Delta f_i \notin [a, d]$时，电动汽车集群以最大充放电功率运作，此时 VPP 系统控制及状态参数不变。

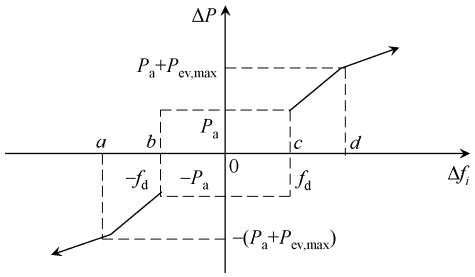


图 5　VPP 功率响应策略

Fig. 5 Power response strategy for VPP

3.2 目标函数

MPC 预测更新控制变量时，需设定目标函数以确保规划问题的求解最优化，该策略下的目标函数表达式为

$$O_{\mathrm{VPP}} = \min(O_1 + O_2) \tag{17}$$

$$O_1 = \sum_{j=1}^{P} [y_i(k+j-1) - y_i(k+j)]Q[y_i(k+j-1) - y_i(k+j)]^{\mathrm{T}} \tag{18}$$

$$O_2 = \sum_{j=1}^{P} [u_{0,i}(k+j-1) - u_{0,i}(k+j)]R[u_{0,i}(k+j-1) - u_{0,i}(k+j)]^{\mathrm{T}} \tag{19}$$

式中：Q、R 为权重系数；y_i 为参考轨迹。虚拟电厂需要考虑 DG 的不确定性影响，要求各个分布式系统合理分配功率输出，以保证电力系统的发电质量。函数 O_{VPP} 是以多区域电力系统 ACE 最小及调频成本最少为目标。目标函数 O_1 表示对输出变量 $y_i(k)$的控制，即控制各区域的区域控制偏差 $A_{\mathrm{CE},i}$ 最小，首次参考轨迹 $y_0(k)$设定为 0；目标函数 O_2 表示对火电厂及虚拟电厂调频成本的控制，$u_0(k)$ 表示各区域火电机组及虚拟电厂内控制输入的变化，在发电过程中，控制偏差较大会导致机组中设备损耗增加，提高维护成本，因此需要控制参考负荷的变化量。

3.3 约束条件

在虚拟电厂参与调频前，火电机组有一定出力，在 $k \geqslant 1$ 时，火电机组参考负荷约束为

$$P_{\mathrm{th,min}} \leqslant \Delta P_{0,i}(k) \leqslant P_{\mathrm{th,max}} \tag{20}$$

式中：ΔP_0 为控制器设定火电机组参考负荷；$P_{\mathrm{th,min}}$ 为火电机组出力约束下限；$P_{\mathrm{th,max}}$ 为火电机组出力约束上限。

对于虚拟电厂中的风储系统，约束可表示为

$$\begin{cases} \beta_0 - \beta_{\min} < \Delta\beta(k) < \beta_{\max} - \beta_0 \\ -E_{\mathrm{bess}} < \Delta P_s(k) < E_{\mathrm{bess}} \\ S_{\mathrm{OC,min}} < S_{\mathrm{OC}}(k) < S_{\mathrm{OC,max}} \end{cases} \tag{21}$$

式中：β_0、$\beta_{\min}$、$\beta_{\max}$ 分别为初始桨距角、桨距角开度的最小值和最大值；$S_{\mathrm{OC,min}}$、$S_{\mathrm{OC,max}}$ 分别为最小、最大荷电状态。在该控制策略中，火电与风储系统优先参与调频，对于风机，液压伺服系统控制桨距角大小，在参与系统调频前，储能系统不输出功率，当荷电状态产生较大的偏移时，会加速电池老化，需要对电池的荷电状态加以控制以延长电池使用寿命。为保证电动汽车用户电池余量，超出频率死区范围时，电动汽车参与系统调频，对电动汽车充放电功率的爬坡速率变化量 $\Delta\zeta_{\mathrm{ev}}$ 约束为

$$-\zeta_{\mathrm{em}} < \Delta\zeta_{\mathrm{ev}} < \zeta_{\mathrm{em}} \tag{22}$$

式中，ζ_{em} 为爬坡约束速率。

4　仿真分析

4.1 系统仿真模型

为比较虚拟电厂参与多区域 LFC 的调频效果，在 MATLAB/Simuink 平台搭建如图 6 的 2 区域 11 节点 LFC 系统模型，区域 1 包含 2 台 300 MW 的火电机组 G_1 及聚合风电、储能和电动汽车的虚拟电厂。其中风电场中包含 100 台单机容量为 1.5 MW 的风电机组，总容量为 150 MW；储能系统设计规模为 10 MW×4 h；电动汽车集群最大利用功率为 5 MW；区域 2 包含 2 台 300 MW 的火电机组。区域 1 及区域 2 的火电机组参数均参考 G_1，

基准值为 100 MW。MPC 控制器离散时间 T=0.1 s，Q=10，R=0.1，m=p=10，具体参数参考文献[12-14]，系统仿真参数见表 1。

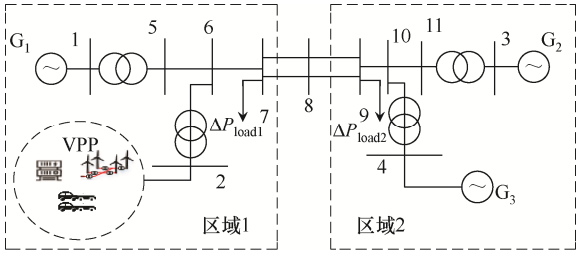


图 6 系统仿真

Fig. 6 System simulation

表 1 仿真参数

Tab. 1 Simulation parameters

参数	数值
一次调频下降率 R_1	0.05
调速器响应时间 T_{g1}/s	0.2
汽轮机响应时间 T_{t1}/s	0.3
电网惯性常数 H_1	11.70
负荷调节常数 D_1	1
电网惯性常数 H_2	5.56
负荷调节常数 D_2	1
同步系数 T_{12}	32.4
斜率 k_β/(MW/°)	−0.088 73
桨距角最大值 β_{max}/(°)	20
初始桨距角 β_0/(°)	15
风机响应时间 T_{wind}/s	1
储能响应时间 T_{bess}/s	0.1
初始荷电状态 $S_{OC,0}$	0.5
充电器响应时间 T_{ev}/s	0.05
汽车集群最大利用功率 $P_{ev,max}$(p.u.)	0.05
火电机组出力约束(p.u.)	−0.3~0.3
爬坡约束 ζ_{em}/(p.u./s)	0.02

4.2 随机扰动

为检验该策略下 DGs 的出力分配能力及 VPP 中各环节分段并网前后对 ACE 的改善效果，设置 3 种场景：场景 1 为传统火电机组调频；场景 2 为风储系统参与调频；场景 3 为本文策略下的虚拟电厂参与调频。参与火电机组的二次调频时，虚拟电厂接入区域 1。在节点 7、节点 9 加入图 7 所示随机负荷扰动 $\Delta P_{load}(k)$，仿真时间 t_s 设定为 100 s，不同场景下 2 区域的区域频率偏差及联络线功率偏差的控制效果如图 8~图 11 所示。

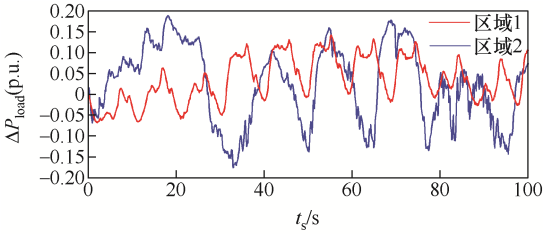


图 7 负荷扰动

Fig. 7 Load disturbances

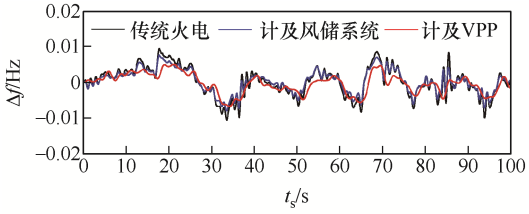


图 8 不同场景下区域 1 频率偏差(随机负荷扰动)

Fig. 8 Frequency deviation in Area 1 under various scenarios (random load disturbance)

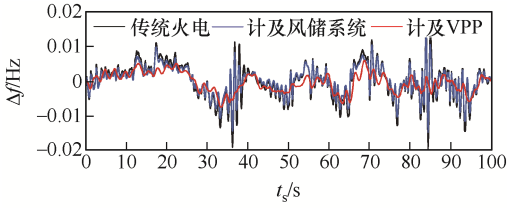


图 9 不同场景下区域 2 频率偏差(随机负荷扰动)

Fig. 9 Frequency deviation in Area 2 under various scenarios (random load disturbance)

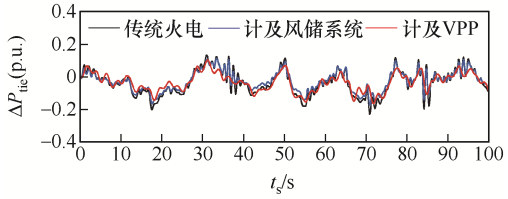


图 10 不同场景下联络线功率偏差(随机负荷扰动)

Fig. 10 Power deviation of tie line under various scenarios (random load disturbance)

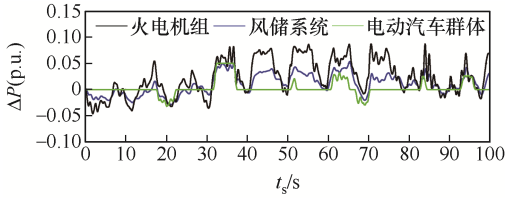


图 11 各调频单元出力分配情况

Fig. 11 Allocation of output from each frequency modulation unit

由图 8~图 10 可知，在本文策略下多区域的 ACE 控制效果更好，2 区域频率偏差曲线及联络线功率偏差曲线更加光滑平稳。场景 2 下风储系统的参与调频可以改善控制效果，2 区域频率偏差及联络线功率偏差最大波动值分别为场景 1 下仅有火电机组调频情况的 74.77%、78.95%及 77.27%。风储联合系统中依靠桨距角调节的风机调节功率的范围广，结合储能系统快速响应增发功率的优势，可减轻系统频率波动。由于区域 2 中负荷扰动较大，会出现 30~40 s、80~90 s 的频率偏差值波动较大的情况。场景 3 下多区域互联系统的频率波动改善较为明显，2 区域频率偏差及联络线功率偏差最大波动值分别为场景 1 情况下的 61.68%、36.84%及 72.72%。

由图 11 可知，当频率波动较小时，仅有火电机组及风储联合系统参与系统调频；当频率波动较大超出设置调频死区时，电动汽车集群接收控制器控制参与系统调频。在 30~40 s、60~70 s、90~100 s 范围内，汽车集群与电网实现功率交互。电动汽车集群的充放电响应速度快，可提供快速功率支撑，以弥补火电机组与风储联合系统调频能力不足。在分段控制下的电动汽车集群并不会频繁参与系统调频，从而减小对汽车用户的影响。

4.3 阶跃扰动

为探究瞬时扰动对多区域电力系统的影响，仿真第 30 s，在区域 1 节点 7 接入 0.2 p.u.的阶跃型负荷扰动，3 种场景下 2 区域 ACE 控制效果如图 12~图 15 所示。

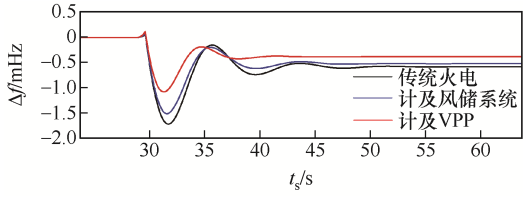


图 12　不同场景下区域 1 频率偏差(阶跃负荷扰动)

Fig. 12 Frequency deviation in Area 1under various scenarios (step load disturbance)

由图 12~图 14 可知，在施加阶跃扰动后，3 种场景下频率及联络线偏差均会出现跌落，场景 1 与场景 2 情况下，2 区域频率偏差及联络线功率偏差在第 55 s 会逐渐趋于稳定，场景 3 在第 45 s 左右保持稳定。场景 3 的稳态频率及最终频率点都得到提高，控制过程中波动更少，动态表现更好。

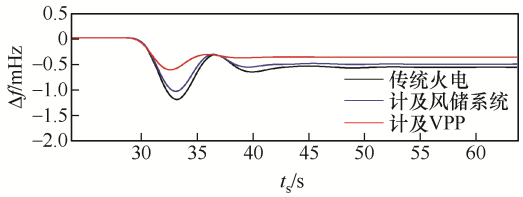


图 13　不同场景下区域 2 频率偏差(阶跃负荷扰动)

Fig. 13 Frequency deviation in Area 2 under various scenarios (step load disturbance)

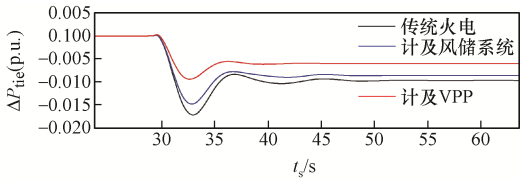


图 14　不同场景下联络线功率偏差(阶跃负荷扰动)

Fig. 14 Power deviation of tie line under various scenarios (step load disturbance)

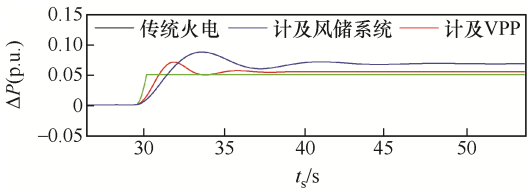


图 15　VPP 中各调频单元功率变化情况

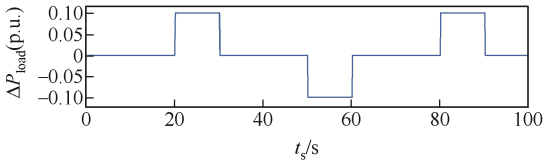
Fig. 15 Power variations in each frequency modulation unit in VPP

由图 15 可知，桨距角控制下风机的响应时间较长，与储能系统配合可以达到快速增发功率效果，VPP 中电动汽车集群功率响应速度最快，可在短时间达到集群最大放电功率 0.05 p.u.，从而弥补风储联合系统参与下调频功率不足。在本文策略下的多区域电力系统 LFC 的联络线功率偏差及频率偏差波动更小，超调量更低，电力系统面对阶跃扰动具有更好的调频能力。

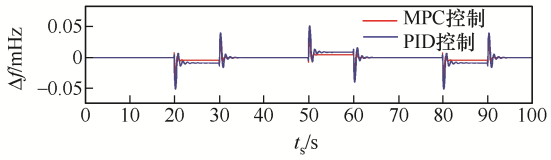
4.4 MPC 与 PID 控制效果对比

为验证本文提出的策略对 ACE 的调整能力，在场景 3 下，在区域 1 加入如图 16(a)所示的连续扰动，并分别利用 PID 及 MPC 控制器进行仿真分

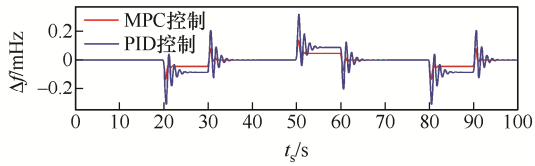
析。从图 16(b)~(d)仿真结果可以看出，在本文的模型下，相较于传统 PID 控制器，频率及联络线功率偏差在 MPC 控制器下具有更少振荡次数、更短调整时间及更低超调量的良好调整效果。



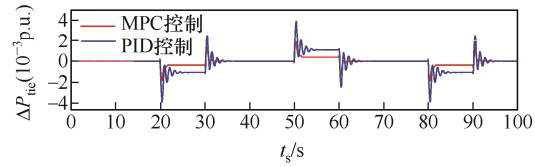
(a) 连续扰动



(b) 区域1频率偏差



(c) 区域2频率偏差



(d) 联络线功率偏差

图 16 MPC 与 PID 控制器 ACE 控制效果比较

Fig. 16 Comparison of control effect on ACE between MPC and PID controllers

5 结语

本文搭建了聚合风储系统及电动汽车的 VPP 参与 2 区域 LFC 模型，提出基于 MPC 的 VPP 内部调频单元分段参与 LFC 策略。MATLAB/Simulink 的仿真结果表明，发生随机及阶跃扰动时，虚拟电厂参与下的 2 区域 ACE 控制调频效果优于未计及虚拟电厂时的情况。调频过程中，所提出模型在约束条件下参与火电机组的二次调频，预测控制决策可优化分配虚拟电厂内各资源功率变化量，保证电力系统经济性的同时，稳定多区域间联络线功率偏差及频率波动，相较于传统 PID 控制器对多区域的 ACE 具有更好的调节效果。

参考文献：

[1] 张剑云，李明节. 新能源高渗透的电力系统频率特性分析[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(11): 3498-3507.
Zhang Jianyun, Li Mingjie. Analysis of the frequency characteristic of the power systems highly penetrated by new energy generation [J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(11): 3498-3507. (in Chinese)

[2] 徐飞阳，薛安成，常乃超，等. 电力系统自动发电控制网络攻击与防御研究现状与展望[J]. 电力系统自动化, 2021, 45(3): 3-14.
Xu Feiyang, Xue Ancheng, Chang Naichao, et al. Research status and prospect of cyber attack and defense on automatic generation control in power system [J]. Automation of Electric Power Systems, 2021, 45(3): 3-14. (in Chinese)

[3] 李嘉媚，艾芊，殷爽睿. 虚拟电厂参与调峰调频服务的市场机制与国外经验借鉴[J]. 中国电机工程学报, 2022, 42(1): 37-55.
Li Jiamei, Ai Qian, Yin Shuangrui. Market mechanism and foreign experience of virtual power plant participating in peak-regulation and frequency-regulation [J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(1): 37-55. (in Chinese)

[4] 潘明杰，解大，王西田. 计及分布式资源调节特性差异的虚拟电厂响应策略[J]. 电力系统自动化, 2022, 46(18): 108-117.
Pan Mingjie, Xie Da, Wang Xitian. Response strategy for virtual power plant considering difference in regulation characteristics of distributed energy resources [J]. Automation of Electric Power Systems, 2022, 46(18): 108-117. (in Chinese)

[5] 袁桂丽，苏伟芳. 计及电动汽车不确定性的虚拟电厂参与 AGC 调频服务研究[J]. 电网技术, 2020, 44(7): 2538-2548.
Yuan Guili, Su Weifang. Virtual power plants providing AGC FM service considering uncertainty of electric vehicles [J]. Power System Technology, 2020, 44(7): 2538-2548. (in Chinese)

[6] Li Jingbang, Gao Ciwei, Yang Jianlin, et al. The modeling of the frequency regulation performance for thermal units and virtual power plants [C]// 2020 5th Asia Confe-

rence on Power and Electrical Engineering (ACPEE). Chengdu, China, 2020: 1940-1944.

[7] Zhang T, Gooi H B. Hierarchical MPC-based energy management and frequency regulation participation of a virtual power plant [C]// IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies, Europe. Istanbul, Turkey, 2015: 1-5.

[8] Shokrani H, Jónsdóttir C M, Milano F. Short-term stochastic modeling of virtual power plants with inclusion of wind, solar and tidal generation and energy storage [C]// 2020 IEEE International Conference on Environment and Electrical Engineering and 2020 IEEE Industrial and Commercial Power Systems Europe (EEEIC/I&CPS Europe). Madrid, Spain, 2020: 1-6.

[9] Tungadio D H, Sun Yanxia. Load frequency controllers considering renewable energy integration in power system [J]. Energy Reports, 2019, 5: 436-453.

[10] 李孟阳, 李国杰, 汪可友, 等. 考虑需求响应及调频性能变化的虚拟电厂日前投标策略[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(3): 13-25.
Li Mengyang, Li Guojie, Wang Keyou, et al. Day-ahead bidding strategy for virtual power plant considering demand response and frequency regulation performance variation [J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(3): 13-25. (in Chinese)

[11] 赵熙临, 林震宇, 付波, 等. 预测优化 PID 方法在含风电电力系统 AGC 中的应用[J]. 电力系统及其自动化学报, 2019, 31(3): 16-22.
Zhao Xilin, Lin Zhenyu, Fu Bo, et al. Application of predictive optimization PID method to AGC of power system with wind power [J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2019, 31(3): 16-22. (in Chinese)

[12] 董天翔, 翟保豫, 李星, 等. 风储联合系统参与频率响应的优化控制策略[J]. 电网技术, 2022, 46(10): 3980-3988.
Dong Tianxiang, Zhai Baoyu, Li Xing, et al. Optimal control strategy for combined wind-storage system to participate in frequency response [J]. Power System Technology, 2022, 46(10): 3980-3988. (in Chinese)

[13] Ma Yuchao, Cruden A, Infield D. A MATLAB simulator for electric drive vehicle to grid implementation [C]// 2010 IEEE International Conference on Industrial Technology. Via del Mar, Chile, 2010: 1097-1101.

[14] 王晖南, 王昱瑾. 基于扰动观测器和鲁棒模型预测的电动汽车集群调频方法研究[J]. 电源学报, 2024, 22(5): 220-229.
Wang Huinan, Wang Yujin. Frequency regulation method for electric vehicles cluster based on disturbance observer and robust model prediction [J]. Journal of Power Supply, 2024, 22(5): 220-229. (in Chinese)

[15] 韩磊, 王育飞, 薛花. 基于浸入与不变理论的电动汽车快充站飞轮储能系统非线性控制策略[J]. 电源学报, 2024, 22(6): 260-268.
Han Lei, Wang Yufei, Xue Hua. Nonlinear control strategy of flywheel energy storage system for electric vehicle fast charging station based on immersion and invariance theory [J]. Journal of Power Supply, 2024, 22(6): 260-268. (in Chinese)

[16] Yang Jun, Zeng Zhili, Tang Yufei, et al. Load frequency control in isolated micro-grids with electrical vehicles based on multivariable generalized predictive theory [J]. Energies, 2015, 8(3): 2145-2164.

[17] 叶林, 路朋, 赵永宁, 等. 含风电电力系统有功功率模型预测控制方法综述[J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(18): 6181-6198.
Ye Lin, Lu Peng, Zhao Yongning, et al. Review of model predictive control for power system with large-scale wind power grid-connected [J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(18): 6181-6198. (in Chinese)



何家乐

作者简介：

何家乐(1999—)，男，中国电源学会会员，硕士研究生。研究方向：新能源电力系统稳定与控制研究。E-mail：h15041978285@126.com。

姜超(1994—)，男，通信作者，博士，助教。研究方向：新能源系统频率稳定研究。E-mail：2305577980@qq.com。

孙正龙(1988—)，男，博士，副教授。研究方向：新能源电力系统稳定与控制，电力信息物理系统。E-mail：nedusunzl@neepu.edu.cn。

Yoash Levron(1978—)，男，博士，副教授。研究方向：电力系统，电力电子。E-mail：yoashl@ee.technion.ac.il。

(责任编辑：郭凯凯)