

计及温控负荷响应的二维云模型分布式频率控制

项雷军[†], 陈 昊, 聂卓赞

(华侨大学 信息科学与工程学院, 福建 厦门 361021)

摘要: 为改善电力系统频率稳定性, 充分调用需求侧可控负荷资源, 本文提出一种计及温控负荷响应的二维云模型分布式频率控制方法. 建立了多区域互联电力系统负荷频率控制模型, 设计了基于福克普朗克方程的温控负荷分布式控制策略, 同时采用云模型算法与分数阶微积分理论, 设计了二维云模型分数阶PID分布式频率控制器. 最后通过控制仿真比较与分析, 验证了在不同运行场景下所提出的综合控制方法具有较优的动稳态性能. 结果表明该控制方法是可行和有效的.

关键词: 多区域电力系统; 二维云模型; 温控负荷; 分数阶PID; 分布式控制

引用格式: 项雷军, 陈昊, 聂卓赞. 计及温控负荷响应的二维云模型分布式频率控制. 控制理论与应用, 2022, 39(10): 1825 – 1835

DOI: 10.7641/CTA.2022.10938

Distributed frequency control based on two-dimensional cloud model considering response for thermostatically controlled loads

XIANG Lei-jun[†], CHEN Hao, NIE Zhuo-yun

(College of Information Science and Engineering, Huaqiao University, Xiamen Fujian 361021, China)

Abstract: In order to improve the frequency stability of power system and fully use the demand-side controllable load resources, the paper proposes a distributed frequency control method based on two-dimensional cloud model considering the response for thermostatically controlled loads. The load frequency control model of multi-area interconnected power systems is established, and a distributed control strategy of thermostatically controlled loads based on Fokker-Planck equations is designed. Meanwhile, the cloud model algorithm and fractional calculus theory are adopted, a distributed fractional-order PID frequency controller based on two-dimensional cloud model is designed. Finally, through control simulation comparison and analysis, it is demonstrated that the proposed integrated control method has better dynamic and steady-state performance in different operation scenarios. The results show that the control method is feasible and effective.

Key words: multi-area power systems; two-dimensional cloud model; thermostatically controlled loads; fractional-order PID; distributed control

Citation: XIANG Leijun, CHEN Hao, NIE Zhuoyun. Distributed frequency control based on two-dimensional cloud model considering response for thermostatically controlled loads. *Control Theory & Applications*, 2022, 39(10): 1825 – 1835

1 引言

频率是衡量电力系统稳定运行的关键性指标, 取决于电源侧与负荷侧的功率实时平衡. 随着电力系统规模的扩大和城市用电负荷密度的不断增长, 加之远距离输电易受自然灾害因素影响, 电力系统电源侧与负荷侧的功率易失衡, 会引发频率波动, 给大规模电力系统频率安全带来严峻挑战^[1-2]. 而对于电力系统负荷频率控制, 传统的集中式控制方式存在设备利用

率低、经济性差、响应速度慢等弊端^[3], 在面对不确定性负荷扰动时, 无法为系统提供必要的惯性与功率支持^[4], 很可能会导致系统联络线功率的偏差和频率的剧烈振荡, 难以保障系统的频率安全. 而分布式控制结构具有灵活性高、与受控单元距离近的特点, 能够极大减少集中控制的通讯压力, 提升电力系统的安全性.

随着通信技术的快速发展, 电力系统的控制形式

收稿日期: 2021-10-01; 录用日期: 2022-02-21.

[†]通信作者. E-mail: lxjiang32@163.com; Tel: +86 18206068321.

本文责任编辑: 朱善迎.

国家自然科学基金项目(61403149), 福建省泉州市科技计划项目(2018Z009), 福建省教育厅科技项目(JA15029)资助.

Supported by the National Natural Science Foundation of China (61403149), the Quanzhou City Science and Technology Program of China (2018Z009) and the Science and Technology Project of Fujian Provincial Education Department (JA15029).

趋向于网络化、分散化^[5],现代电力系统通常由多个控制区域通过联络线构成复杂结构的大系统^[6].如何设计高效的频率控制策略,是多区域互联电力系统负荷频率控制亟须解决的问题.目前有模型预测控制^[6]、自抗扰控制^[7]、滑模控制^[8]、神经网络控制^[9]、鲁棒控制^[10]等应用于多区域电力系统的分布式频率控制中.上述控制方法大多需要复杂的结构和控制参数计算,实现起来有一定的难度,同时其中滑模变结构算法在控制点切换时会有颤振现象,很难从设计上剔除^[11].为了在实现对电力系统有效控制的同时,简化控制结构并且减轻计算量,本文提出一种将云模型控制与分数阶PID (fractional-order proportion integration differentiation, FOPID)控制相结合的二维云模型控制方法.云模型控制是近些年提出的一种新颖的控制方法,它将模糊性和随机性结合在一起,改善了传统模糊控制的单一性,实现简单且不依靠系统模型,具备更轻的灵活性^[12].分数阶控制方法是传统整数阶PID (integral-order proportion integration differentiation, IOPID)控制方法的扩展,在传统PID控制方法的基础上要多出2个可调节的参数,调节范围更宽广^[13].云模型控制与分数阶PID控制相结合,能够实现优势互补,有效弥补多区域电力系统频率控制的不确定性.

除了对控制器的改进,负荷侧分布式响应策略的研究也是区域负荷频率控制研究的一大热点.温控负荷作为负荷侧一种较为理想的可控响应资源,具有在电力系统占比高、相应迅速、易于控制的特点,文献[14–15]验证了温控负荷参与频率控制的可行性,同时目前很多关于温控负荷控制策略的研究过于追求温控负荷电气特性的数字化实现,导致了控制策略的低效.在制定温控负荷分布式控制策略时,如何提高温控负荷模型拟真程度的同时,充分利用、改进分布式控制器,保障温控负荷分布式控制策略与区域分布式控制器的优势得以充分发挥,是本文研究的重点和贡献所在.

本文提出了一种计及温控负荷响应的二维云模型分布式频率控制方法.建立了多区域互联电力系统模型,设计了基于福克–普朗克方程(Fokker-Planck equations, FPES)的温控负荷分布式控制策略,同时考虑云模型理论与分数阶微积分理论,设计了二维云模型FOPID控制器,最后通过仿真比较与分析验证了在不同场景下所提出的温控负荷分布式控制策略和二维云模型FOPID控制器的有效性.

2 多区域电力系统模型

对于频率稳定性而言,控制的快速性是决定控制效果的关键因素^[16].多区域系统若采用集中控制,控制中心与受控机组之间相距甚远,控制信号传输过程中的时滞与失真会导致调频的补偿量偏离预测量,使区域的调频效果变差.采用分布式控制,各区域由专

门的控制器控制调频机组,保持各区域动态调频的协调性,减少控制信号在传输过程中的损失,能够显著抑制各区域的频率波动,保持区域的频率稳定.

本文在建立三区域互联电力系统的基础上讨论区域的负荷频率控制.互联电网的负荷频率控制模型统一线性化后进行描述^[17],三区域互联电力系统的控制框图如图1所示,相关参数如附录表A1所示.

图1中: T_g 为调速器时间常数; T_t 为汽轮机时间常数; D 为负荷阻尼系数; H 为区域机组惯性常数; R 为调差系数; B 为区域偏差系数; T_{AC} 为温控负荷时间常数.

电力系统的二次调频通常采用自动发电控制(automatic generation control, AGC),参考区域频率波动时的区域控制偏差(area control error, ACE)信号,调节该区域内调频机组的发电输出.根据区域偏差定义,区域的偏差控制信号可以由式(1)计算得到

$$ACE = \Delta P_{tie,i} + B_i \Delta f, \quad (1)$$

式中: Δf 为区域电力系统频率偏差; $\Delta P_{tie,i}$ 为联络线交换功率; 区域偏差系数 B 在式(2)中定义

$$B_i = D_i + 1/R_i. \quad (2)$$

3 温控负荷分布式控制策略

3.1 温控负荷模型

典型的温控负荷包含着空调、冰箱、热水器,本文以空调作为研究对象,使用的模型和控制策略也可推广到其他的温控负荷.空调个体的用电特性通常使用等值热力学(equivalent thermal parameter, ETP)模型来进行描述,ETP模型通常为二阶模型,文献[18]可对ETP模型进行降阶.在空调的ETP模型中,其实时温度继承于上一时间段的温度值,同时需要考虑门窗开关、人员进出等随机小变量对室内温度造成的影响,综上所述,该ETP模型需要考虑维纳过程,表达为

$$dx = \left(\frac{G}{C}(x_0 - x) + \frac{s\alpha m P}{C} \right) dt + dv_i, \quad (3)$$

式中: x_0 , x 分别为外界和室内温度; C 为房间的等效热容; G 为等效热导; s 为空调的运行模式,可取值“1”或者“−1”,即制冷或制热模式; m 为空调开关状态,可取值“0”或者“1”,即关闭或开启状态; α 为能效比(coefficient of performance, COP),表示空调的制冷量与实际功率的比值; P 为空调的实际工作功率; v_i 表示维纳过程; t 表示时间.

单体的温控负荷容量很小,不能满足分布式调频控制的调控需要,通常使用集群技术将某区域内的温控负荷集中,组成负荷集群(load aggregator, LA)接收控制指令. LA作为容量较大的可控负荷单位,在电力系统发生频率波动时,通过温控负荷控制策略控制内部的温控负荷个体,实现快速响应,如图2所示.

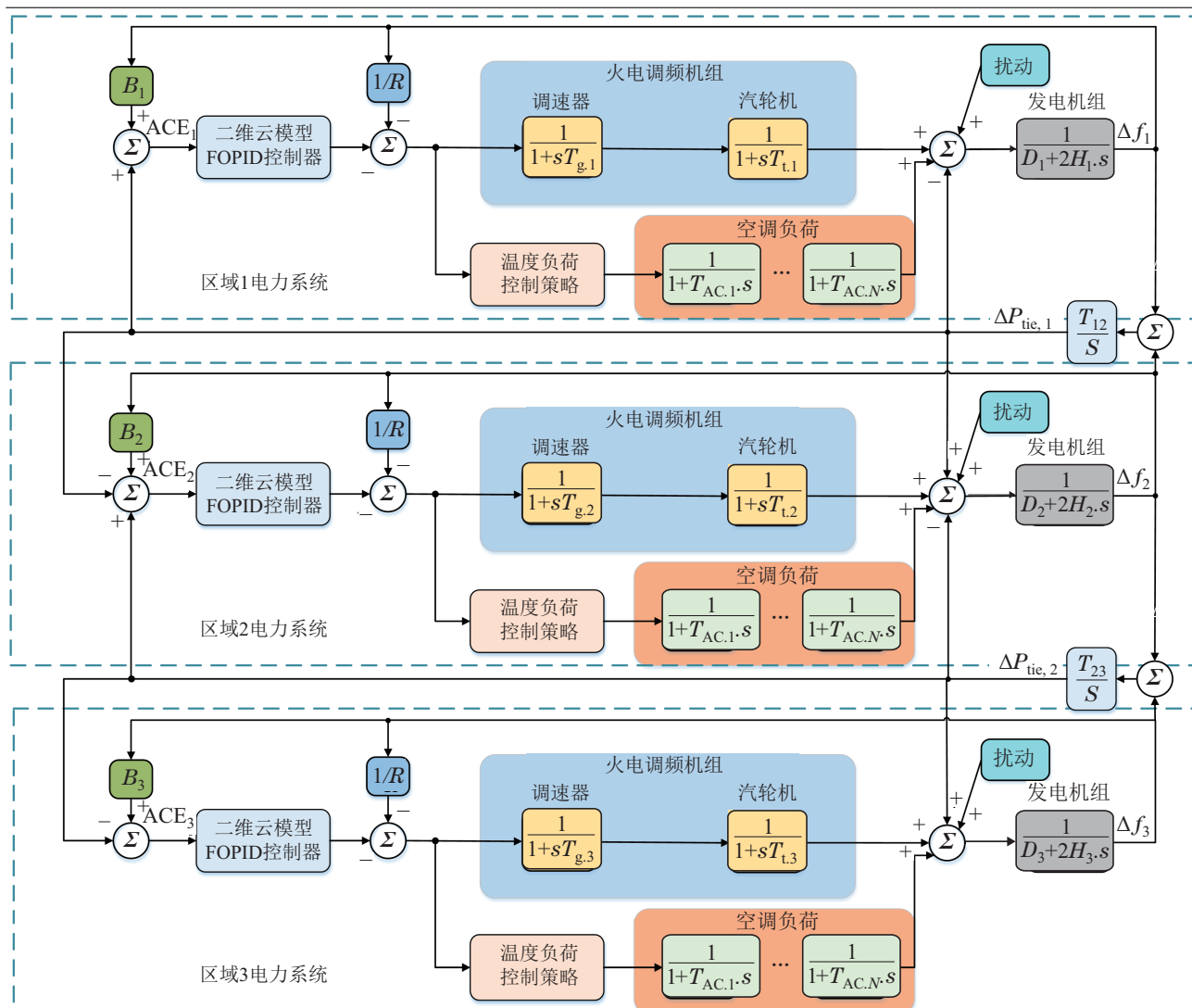


图 1 三区域互联电力系统控制结构框图

Fig. 1 Control block diagram of three-area interconnected power system

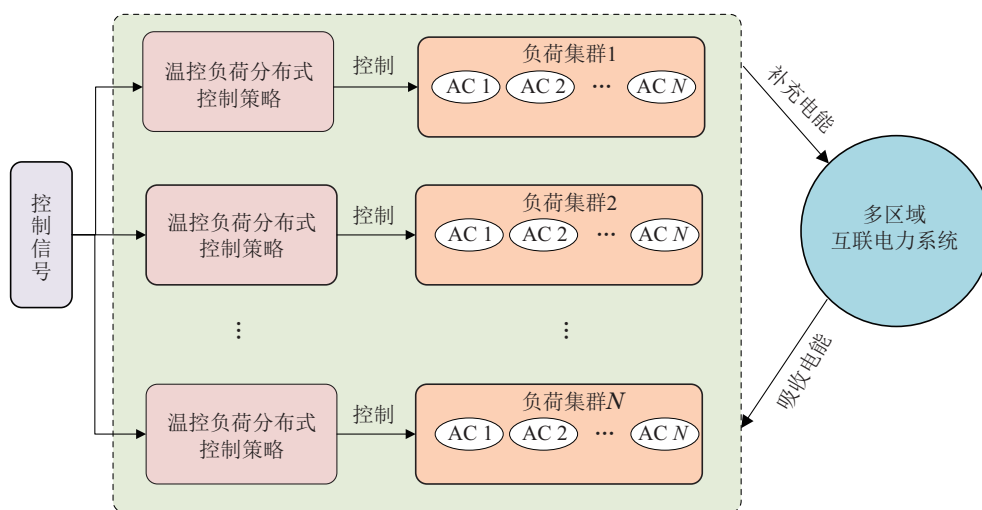


图 2 负荷集群响应示意图

Fig. 2 Schematic diagram of LA responses

3.2 基于FPES的温控负荷分布式控制策略

温控负荷控制策略本质上是对LA中温控负荷可控个体进行短暂的切机或者投入操作, 为提高控制效果, 需要提前对LA中温控负荷个体的开关状态进行预测. 较为简易的方法有轮盘赌^[19]、线性化模型^[20]等方式, 为提高预测的准确度, 本文使用Fokker-Planck方程对温控负荷进行描述. 温控负荷属于开关型电器, 其开关状态在短时间段内可归纳于伯努利随机分布; 同时考虑到用户会更希望空调等温控负荷运行在期望的温度域内, 结合空调的电气特性, 温控负荷的分布如图3所示.

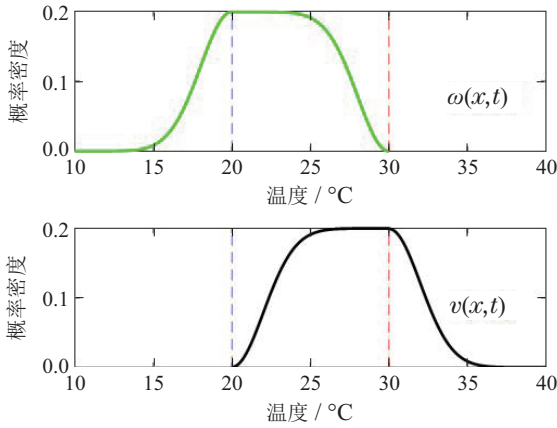


图3 温控负荷(制冷式)开关状态的随机分布

Fig. 3 Stochastic distribution of switching state of TCLs

图3中: ω 表示温控负荷处于“开启”状态的概率分布曲线; v 表示“关闭”状态的概率分布曲线; x 代表设定温度; t 代表运行时间. 为考虑用户的舒适度, 避免压缩机的频繁启停, 温控负荷的开关状态用如下函数表示:

$$m_{\text{TCL}} = \begin{cases} 0, & T \geq T_{\text{high}}, \\ 1, & T \leq T_{\text{low}}, \\ w, & T_{\text{low}} \leq T \leq T_{\text{high}}, \end{cases} \quad (4)$$

式中: m_{TCL} 为温控负荷的开关状态; T 为温控负荷主要作用部分的实际温度; $T_{\text{high}}, T_{\text{low}}$ 表示设定温度的上下限, 一般采用用户最舒适的温度区间; w 状态待定, 根据控制策略进行灵活控制.

得出, 温控负荷开关状态所占的比重可表示为

$$\int_{-\infty}^{x_+} \omega(x, t) dx = \Pr[x(t) \leq x_+ \cap m(t) = 1], \quad (5)$$

$$\int_{x_-}^{\infty} v(x, t) dx = \Pr[x(t) \geq x_- \cap m(t) = 0]. \quad (6)$$

通过式(5)–(6)分别求得处于“开启”、“关闭”状态的温控负荷总数. 同时, 考虑到温控负荷周围环境的随机性小变化, 对于一个均匀参数的负荷群, 负荷模型可以用如式(7)–(8)所示的Fokker-Planck方程进行描述

$$\text{ON: } \frac{\partial \omega}{\partial t}(x, t) = \frac{\partial}{\partial x} \left(\beta \frac{\partial \omega}{\partial x}(x, t) - \alpha_1(x) \omega(x, t) \right) + \delta_{0 \rightarrow 1}(x, t), \quad (x, t) \in Q_{\infty}, \quad (7)$$

$$\text{OFF: } \frac{\partial v}{\partial t}(x, t) = \frac{\partial}{\partial x} \left(\beta \frac{\partial v}{\partial x}(x, t) - \alpha_0(x) v(x, t) \right) + \delta_{1 \rightarrow 0}(x, t), \quad (x, t) \in Q_{\infty}, \quad (8)$$

式中: β 为扩散系数; $\delta(x, t)$ 为负荷状态改变导致的扰动流; α 为漂移指标.

α 漂移指标由式(3)的ETP模型拆分成开关两种状态求得, 表示为

$$\alpha_1 = \frac{G}{C} (x_0 - x - \frac{P}{G} \times 1), \quad (9)$$

$$\alpha_0 = \frac{G}{C} (x_0 - x). \quad (10)$$

得到LA内温控负荷在连续时域内的状态变化, 如式(11)所示:

$$N_{\text{LA}}(t) = \int_{\underline{x}}^{\bar{x}} (\omega(x, t) + v(x, t)) dx, \quad t \geq 0, \quad (11)$$

在式(7)–(8)中增加考虑系统的功率损耗, 引入温度的参考量, 如式(12)–(14)所示:

$$\begin{aligned} \text{ON: } \frac{\partial \omega}{\partial t}(x, t) = & \frac{\partial}{\partial x} \left(\beta \frac{\partial \omega}{\partial x}(x, t) - (\alpha_1(x) - \right. \\ & \left. u(t)) \omega(x, t) \right) + \delta_{0 \rightarrow 1}(x, t), \quad (x, t) \in Q_{\infty}, \quad (12) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{OFF: } \frac{\partial v}{\partial t}(x, t) = & \frac{\partial}{\partial x} \left(\beta \frac{\partial v}{\partial x}(x, t) - (\alpha_0(x) - \right. \\ & \left. u(t)) v(x, t) \right) + \delta_{1 \rightarrow 0}(x, t), \quad (x, t) \in Q_{\infty}, \quad (13) \end{aligned}$$

$$u(0) = \dot{x}_{\text{ref}}, \quad (14)$$

式中 $u(t)$ 为参考温度的动态设定值. 参考式(11)–(14), 把加权总功率作为LA的输出, 如式(15)所示:

$$y_d(t) = \frac{P}{\eta} \int_{\underline{x}}^{\bar{x}} (ax + b) \omega(x, t) dx, \quad (15)$$

式中: a 为加权系数; b 为漂移值.

为更好的跟踪电力系统的频率偏差, 引入控制信号, 设定功率参考值 y , 标记功率偏差 $e(t)$ 为

$$e(t) = y(t) - y_d(t), \quad (16)$$

式中: $y(t)$ 为功率参考值; y_d 为Fokker-Planck概率方程推测值. 由此得到

$$\begin{aligned} \frac{de}{dt} = & \frac{P}{\eta} \int_{\underline{x}}^{\bar{x}} (ax + b) \frac{\partial \omega}{\partial t} dx = \\ & \frac{P}{\eta} \int_{\underline{x}}^{\bar{x}} (ax + b) \frac{\partial}{\partial x} \left(\beta \frac{\partial \omega}{\partial x} - (\alpha_1(x) - u(x)) \omega \right) dx + \\ & \frac{P}{\eta} \int_{\underline{x}}^{\bar{x}} (ax + b) \delta(x, t) dx. \end{aligned} \quad (17)$$

经过分部积分, 得到

$$\begin{aligned} \frac{de}{dt} = & -\frac{P}{\eta} \int_{\underline{x}}^{\bar{x}} a \left(\beta \frac{\partial \omega}{\partial x} - (\alpha_1(x) - u(t)) \omega \right) dx + \\ & \frac{P}{\eta} \int_{\underline{x}}^{\bar{x}} (ax + b) \delta(x, t) dx, \end{aligned} \quad (18)$$

$$u(t) = -\frac{\int_{\underline{x}}^{\bar{x}} (\beta \frac{\partial \omega}{\partial x} - \alpha_1(x)\omega) dx + \frac{\eta}{aP} \Phi(t)}{\int_{\underline{x}}^{\bar{x}} \omega dx} =$$

$$-\frac{\beta(\omega(\bar{x}, t) - \omega(\underline{x}, t)) - \int_{\underline{x}}^{\bar{x}} a_1(x)\omega dx + \frac{\eta}{aP} \Phi(t)}{\int_{\underline{x}}^{\bar{x}} \omega dx}, \quad (19)$$

$$\Gamma(t) = \frac{P}{\eta} \int_{\underline{x}}^{\bar{x}} (ax + b)\delta(x, t) dx, \quad (20)$$

式中 $u(t)$ 中起调节作用的参量为 $\Phi(t)$, 将动态误差方程规范化后, 得到

$$\frac{de'}{dt} = \Phi(t) + \Gamma(t), \quad (21)$$

式中 $\Phi(t)$ 为辅助控制信号, 代表着下垂控制信号和本文二维云模型控制器输出的分数阶PID控制信号, 则式(21)可拆分为

$$\frac{de'}{dt} = \Phi_1(t) + \Phi_2(t) + \Gamma(t), \quad (22)$$

$$\Phi_1(t) = -(K_p + \frac{K_i}{s^\lambda} + K_d s^\mu) e(t), \quad (23)$$

$$\Phi_2(t) = -k_0 e(t). \quad (24)$$

将温度参考量修改为

$$x_{\text{ref}}(t) = x_{\text{ref}}(0) + \int_0^t u(\tau) d\tau. \quad (25)$$

在控制信号的作用下, 分布的温控负荷控制器跟踪频率偏差, 实时调整温控负荷的开关状态, 对式(4)和式(11)进行调整, 当分散的温控负荷状态从“开启”转变为“关闭”时, 可以提供预防频率跌落的储备容量; 从“关闭”转变为“开启”状态时, 可以提供预防频率快速上升的储备容量。

4 二维云模型分布式控制器设计

4.1 FOPID频率控制器设计

FOPID控制器是对传统PID做出的改进, 在不改变PID结构的基础上, 增加 λ 和 μ 两个自由度, 拓宽了传统PID的参数调节范围, 并采用二维云模型在线整定控制器参数. 本文设计的FOPID频率控制器的结构如图4所示。

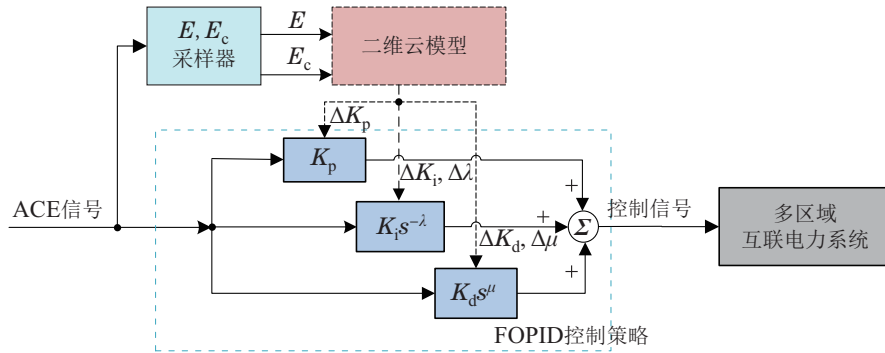


图 4 FOPID频率控制器结构框图

Fig. 4 Block diagram of FOPID frequency controller

FOPID控制器的数字实现主要是通过对分数阶微积分算子的近似模拟, 如式(26)所示. 常用的算子定义有 Riemann-Liouville (RL) 定义和 Grunwald-Letnikov (GL) 定义^[21]. 本文使用的是GL定义, 如式(27)所示:

$${}_a D_t^\gamma = \begin{cases} \frac{d^\gamma}{dt^\gamma}, & \text{Re}(\gamma) > 0, \\ 1, & \text{Re}(\gamma) = 0, \\ \int_a^t (d\tau)^{-\gamma}, & \text{Re}(\gamma) < 0, \end{cases} \quad (26)$$

$${}_a D_t^\gamma = \lim_{h \rightarrow 0} \frac{1}{\Gamma(\gamma)} h^{-\gamma} \sum_{k=0}^{[(t-a)/h]} \frac{\Gamma(k+\gamma)}{\Gamma(k+1)} f(t-kh), \quad (27)$$

式中 h 为步长. GL定义将积分和微分统一, 简化了近似过程. 分数阶算子与 t 时刻的输入信号结合, 拉普拉斯变化后得到 s 域传递函数^[22], 如式(28)所示:

$$\mathcal{L}\{{}_a D_t^\gamma g(t)\} = s^\gamma G(s). \quad (28)$$

对于算子 s^γ 的近似模拟, Oustaloup方法是使用较多的实现方法. Oustaloup 将算子 s^γ 在近似域 $[\omega_b, \omega_h]$ 内使用分数阶传递函数 $K(s)$ 展开, 如式(29)–(32)所示. 在实际的模拟仿真中, 通过离散化、近似化来实现真正的分数阶行为。

$$s^\gamma \approx \mathcal{O}(s^\gamma) = K' \prod_{k=1}^N \frac{s + \omega'_k}{s + \omega_k}, \quad (29)$$

$$K' = \omega_h^\gamma, \quad (30)$$

$$\omega'_k = \omega_b \left(\frac{\omega_h}{\omega_b} \right)^{\frac{2k-1-\gamma}{2N}}, \quad (31)$$

$$\omega_k = \omega_b \left(\frac{\omega_h}{\omega_b} \right)^{\frac{2k-1+\gamma}{2N}}. \quad (32)$$

4.2 云模型概念

云模型的概念由李德毅院士提出, 是一种由自然语言值表示, 代表定性概念与定量概念之间不确定性的转换模型. 它将模糊控制中的模糊概念与概率论中

的随机性结合,改善了模糊控制规则的单一性,在面对电力系统不确定性干扰具有优良的控制器在线调参效果。

云的数字特征由期望(Expected value, E_x)、熵(Entropy, E_n)和超熵(Hyper entropy, H_e)组成^[12],根据设想云的数字特征生成以 E_n 为期望, H_e 为标准差的正态随机数 E_n^* ,进一步生成以 E_x 为期望, E_n^* 为标准差的正态随机数 x ,即为空间上的一个云滴。云滴汇集形成的集合,就是某种概念的云模型,如图5所示。

4.3 二维云模型FOPID控制器结构

在多区域电力系统的负荷频率控制中,二维云模型主要实现的是由偏差信号 E 和偏差变化率 E_c 到FOPID控制器输入之间的映射。基于二维云模型的控制参数整定原理框图如图6所示,二维云模型优化算法流程图如图7所示。采样系统通过对各区域频率偏差 Δf_i 、区域偏差系数 B_i 、联络线交换功率偏差 $\Delta P_{tie,i}$ 进行采样,计算得到的ACE值记为偏差信号 E ,对ACE进行微分求得得到偏差变化率 E_c ,将 E 和 E_c 作为二维云模型处理器的输入,进行云化。为了实现输入量从数值到状态语言的转化,对输入量 E , E_c 按照从小到大进行划分,总共分为7个区域,记为 E_1 , E_2 ,

$\dots$, E_7 , E_{c1} , E_{c2} , $\dots$, E_{c7} 。云模型的控制规则库根据自然语言来建立,将自然语言记为“负大NB”、“负中NM”、“负小NS”、“零ZE”、“正小PS”、“正中PM”、“正大PB”7个集合,各语言值的最大隶属度均取值为1,以云模型的3个数字特征表示,如表1所示。

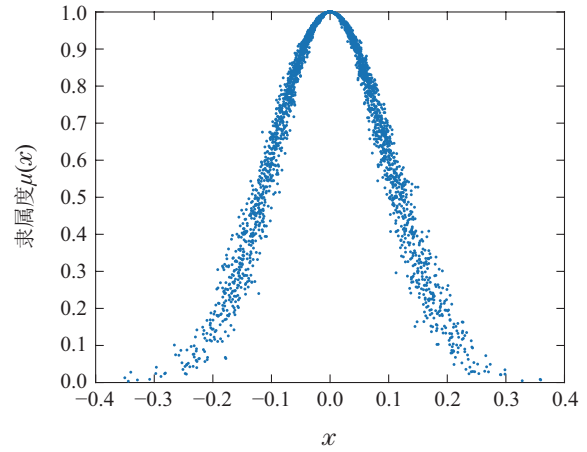


图5 云模型的数字概念

Fig. 5 Digital concept of cloud model

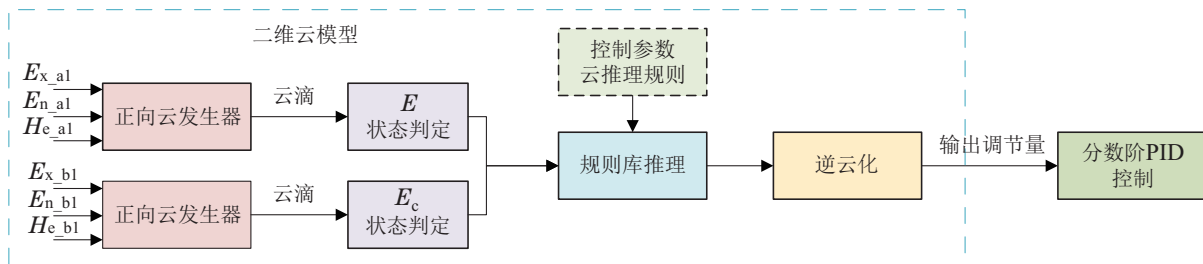


图6 基于二维云模型的控制参数整定原理框图

Fig. 6 Structure diagram of two-dimensional cloud model FOPID controller

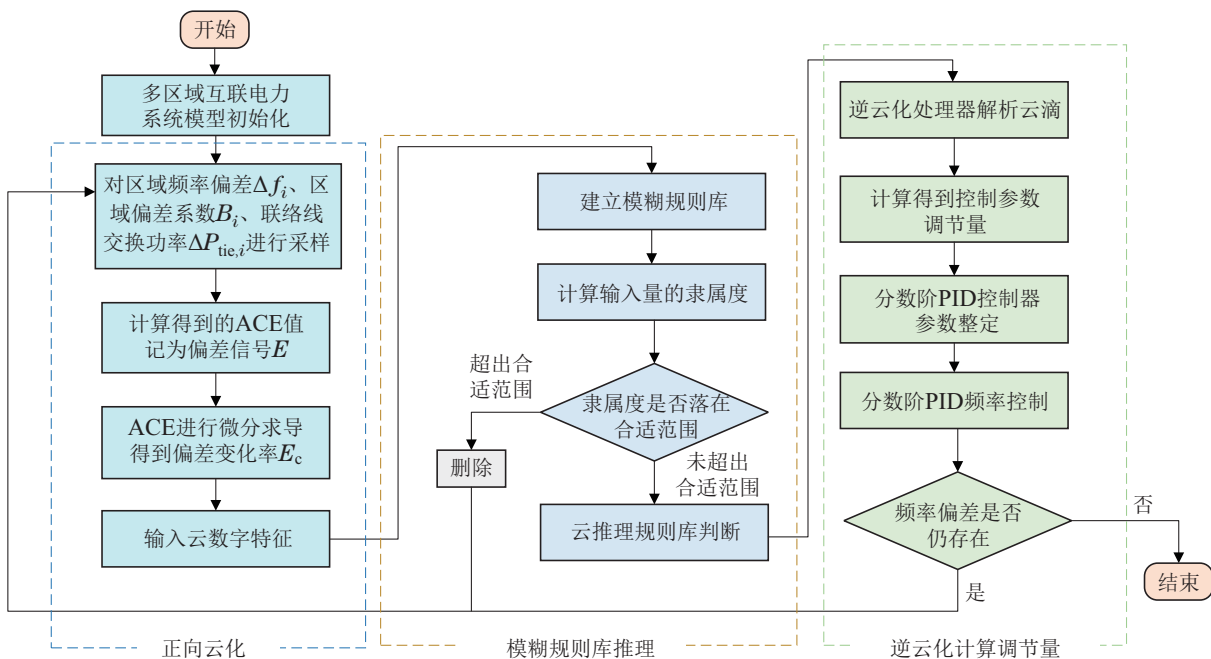


图7 二维云模型优化算法流程图

Fig. 7 Flow chart of two-dimensional cloud model optimization algorithm

表 1 二维云模型的数字特征

Table 1 Digital characteristics of two-dimensional cloud model

参量名称	定性特征(E_x, E_n, H_e)						
偏差量 E	负大 (-0.6, 0.1, 0.01)	负中 (-0.4, 0.1, 0.01)	负小 (-0.2, 0.1, 0.01)	零 (0, 0.1, 0.01)	正小 (0.2, 0., 0.01)	正中 (0.4, 0.1, 0.01)	正大 (0.6, 0.1, 0.01)
偏差变化率 E_c	负大 (-0.6, 0.1, 0.01)	负中 (-0.4, 0.1, 0.01)	负小 (-0.2, 0.1, 0.01)	零 (0, 0.1, 0.01)	正小 (0.2, 0.1, 0.01)	正中 (0.4, 0.1, 0.01)	正大 (0.6, 0.1, 0.01)

为判断输入量落在哪一个集合中, 根据 E_n^*, E_x, x 计算隶属度, 得到输入量的定性概念, 计算函数为

$$\mu = \exp\left[-\frac{(x - E_n^*)^2}{2(E_n^*)^2}\right]. \quad (33)$$

重复计算 N 个云滴的隶属度, 完成对输入量的云化. 云化结束后, 根据建立的云推理规则库将输入量的自然语言转变为输出调节量的自然语言, 来得到分数阶 PID 参数调整量. 各参数的云推理规则表如附录表 A3–A7 所示. 通过逆云化处理器得到最终控制参数的调整量. 在推理规则表中对应的调节参数的期望值为 c_0 , 输出的云滴表示为 $\text{drop}(c_0, \mu)$, 将云滴中的隶属度参数 μ 代入公式

$$\Delta c = \sqrt{-2(\log \mu) E_n^2}, \quad (34)$$

求得调整量 Δc , 调节参数 c 为

$$c = c_0 + \Delta c. \quad (35)$$

对 N 个云滴的 c 值进行整合并取平均值, 得到的 $\bar{c}$ 即为最终控制参数的调整量. 不同推理规则下求得的控制参数 $\bar{c}$ 不同, 将 $\bar{c}$ 用相应的控制参数进行替换, 得到经过二维云模型处理后的分数阶 PID 控制器参数的调整量 $\Delta K_p, \Delta K_i, \Delta K_d, \Delta \lambda, \Delta \mu$.

5 系统控制仿真分析

为了验证本文所提出的分布式频率控制方法的有效性, 利用 MATLAB/Simulink 搭建了如图 1 所示的三区域互联电力系统负荷频率控制系统. 温控负荷中空调的数量默认为 3000, 环境温度为 30°C. 接下来围绕 3 种不同的运行场景对本文提出的分布式频率控制方法进行仿真比较与分析.

5.1 计及不同温控负荷响应的控制仿真分析

温控负荷的调控因子代表着温控负荷参与频率控制积极程度, 为了分析不同调控因子对于温控负荷分布式控制策略的影响, 在仿真中调控因子取 0, 0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5, 在 0 s 时区域 2 发生 0.1 p.u. MW 的阶跃负荷扰动, 控制器选用二维云模型 FOPID. 图 8 为区域二内不同调控因子下温控负荷分布式频率控制策略的控制效果.

由图 8 可知, 在调控因子等于 0 时, 温控负荷分布式控制策略不参与调频, 区域调频主要依靠调频机组改变出力和联络线交换功率, 负荷侧不对频率波动做出

响应, 此时区域调频效果较差, 恢复稳定所需的时间较长; 随着调控因子的增加, 区域调节频率的能力逐渐增强, 频率调节效果得到改善; 当调控因子增加到 0.4 及以上时, 温控负荷对频率偏差的消纳能力变差, 频率振荡幅值再度增大, 恢复稳定的时间变长, 这是由于随着调控因子增加, 区域内温控负荷参与调频的急切程度增大, 过多的负荷参与调频超出了预计所需, 导致区域系统负荷不能达到预定值, 削减了分布式控制策略的控制效果, 频率响应性能变差. 经过多次实验, 调频效果较为理想的调控因子应在 [0.2, 0.3] 之间取值.

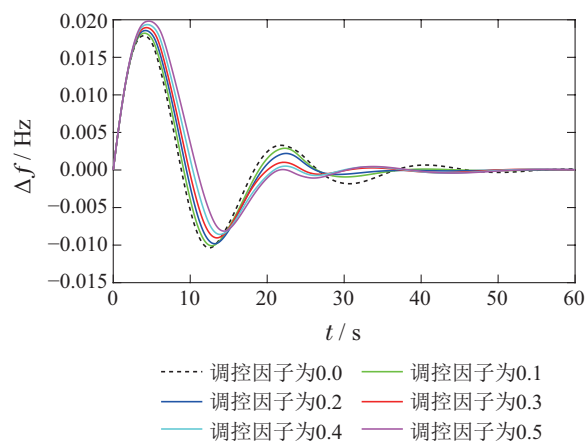


图 8 不同调控因子下温控负荷分布式控制策略的控制效果

Fig. 8 Effect of TCL distributed control strategy under different regulatory factors

为了衡量温控负荷分布式控制策略受区域内可控温控负荷数量的限制程度, 控制区域内温控负荷的数量为 1000, 3000, 10000, 在 0 s 处区域 2 内施加 0.1 p.u. MW 的扰动信号, 结果如图 9 所示.

从图 9 可以看出, 在增大 LA 规模到 10000 户家庭后, 微电网频率振荡次数明显减少, 恢复稳定速度加快. 表明采用本文所提温控负荷调度策略, 扩大温控负荷受控规模, 能够提升系统调频的备用容量, 改善系统频率稳定性.

5.2 阶跃负荷扰动场景下控制仿真分析

为验证所提出二维云模型 FOPID 的控制效果, 根据图 1 搭建多区域电力系统模型, 控制器选用传统 PID、二维云模型 PID、二维云模型 FOPID, 控制器参

数如附录表A2所示. 在0 s时在区域2施加0.1 p.u.MW的阶跃扰动信号, 在25 s时在区域1施加-0.05 p.u.MW的阶跃扰动信号, 调控因子取0.2. 控制仿真得到结果如图10-14所示, 其中图10-12为不同控制器作用下各区域频率偏差响应比较曲线, 图13-14分别为区域12和23联络线交换功率偏差响应曲线.

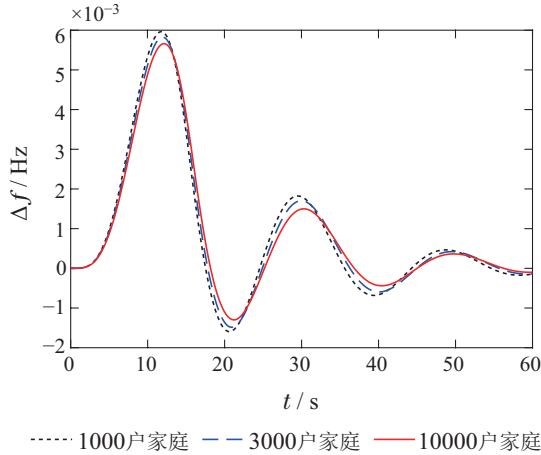


图9 不同受控规模的区域频率偏差响应

Fig. 9 Regional frequency deviation response of different controlled scales

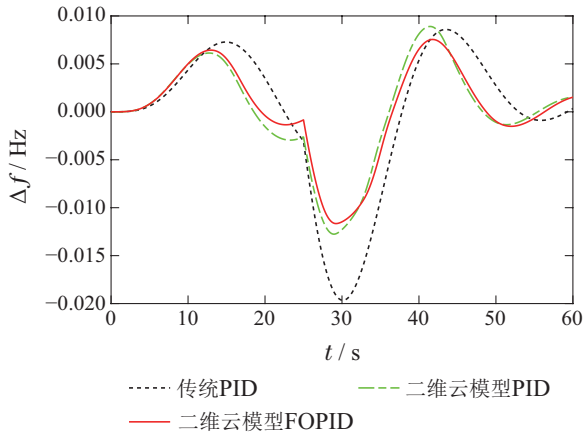


图10 区域1的频率偏差响应

Fig. 10 Frequency deviation response of area 1

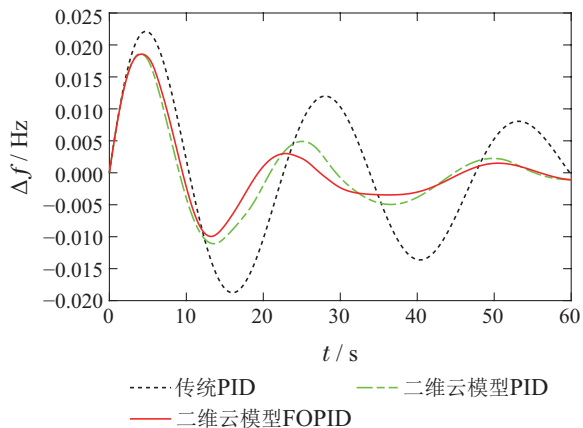


图11 区域2的频率偏差响应

Fig. 11 Frequency deviation response of area 2

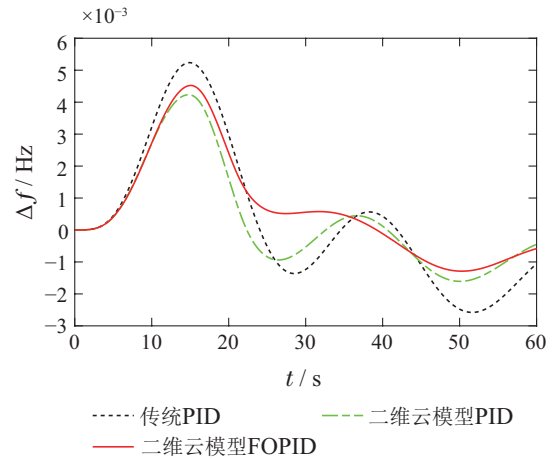


图12 区域3的频率偏差响应

Fig. 12 Frequency deviation response of area 3

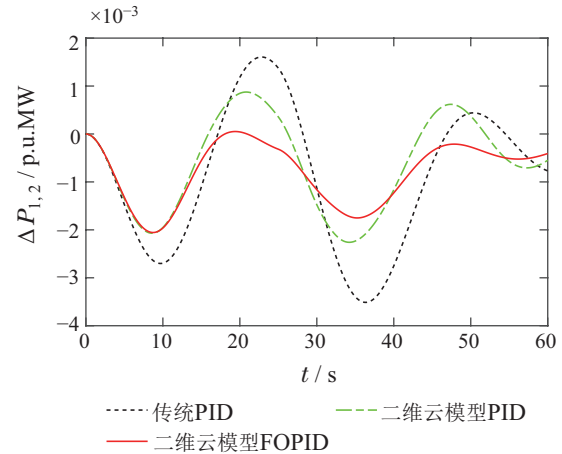


图13 区域1, 2联络线交换功率偏差响应

Fig. 13 Exchange power deviation response of tie-line between area 1 and 2

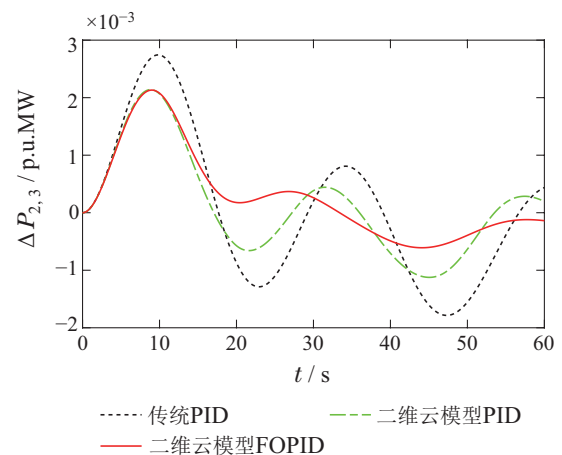


图14 区域2, 3联络线交换功率偏差响应

Fig. 14 Exchange power deviation response of tie-line between area 2 and 3

从图10-14中明显看出, 采用二维云模型FOPID控制器, 区域系统的二次调频响应能力显著上升, 区域间联络线上交换功率较小, 频率波动的峰值下降, 恢复稳定的速度加快, 控制效果明显优于其他两种控

制器. 如表2所示, 本文从4个维度对控制器性能进行量化评估, 结果表明二维云模型FOPID在不同区域都具有更好的性能表现, 性能指标都低于平均值, 表明二维云模型FOPID具有较强跟踪频率偏差的能力, 使多区域系统负荷频率控制的动态性能得到了较大提高, 能够更好的保障多区域电力系统的安全稳定运行.

表 2 不同控制器的性能指标对比

Table 2 Comparison of performance indexes of different controllers

控制器性能指标	IAE	ISE	ITAE	ITSE
传统PID	0.2651	0.002374	7.684	0.06871
二维云模型PID	0.1902	0.00114	5.312	0.0313
二维云模型FOPID	0.1782	0.001046	4.934	0.02821
平均值	0.2112	0.00152	5.977	0.04274
传统PID	0.4139	0.004654	8.569	0.06848
二维云模型PID	0.2774	0.002565	4.784	0.02676
二维云模型FOPID	0.2304	0.002237	3.394	0.01757
平均值	0.3072	0.003152	5.582	0.0376
传统PID	0.1028	0.000309	2.874	0.007141
二维云模型PID	0.07313	0.000173	1.897	0.00343
二维云模型FOPID	0.07129	0.000172	1.74	0.0031
平均值	0.08241	0.000218	2.17	0.004557

5.3 随机负荷扰动场景下控制仿真分析

实际情况下负荷扰动会收到随机量的干扰, 为随机性、不可预测的随机扰动. 在阶跃扰动的基础上, 再在3个区域分别设置幅值为 $[-0.1 \text{ p.u.MW}, 0.1 \text{ p.u.MW}]$ 的随机扰动, 控制器分别选用传统PID、二维云模型PID、二维云模型FOPID, 各区域频率偏差响应比较曲线如图15–17所示.

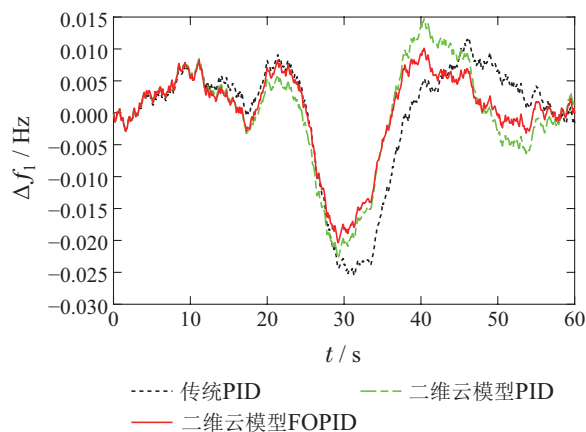


图 15 区域1的频率偏差响应

Fig. 15 Frequency deviation response of area 1

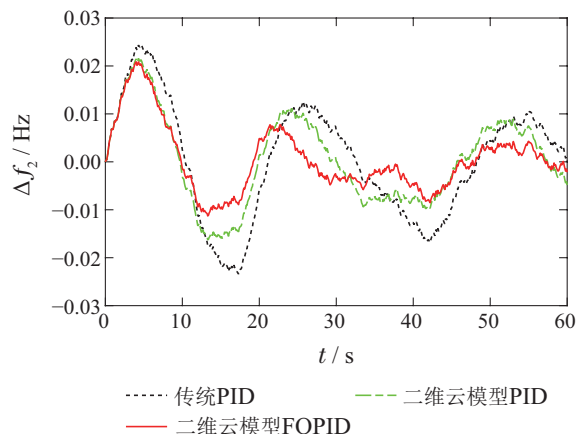


图 16 区域2的频率偏差响应

Fig. 16 Frequency deviation response of area 2

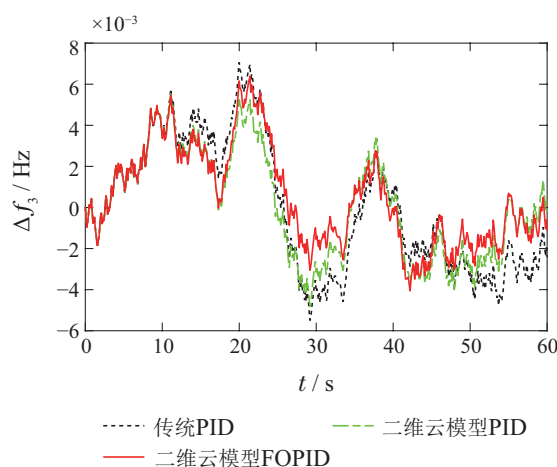


图 17 区域3的频率偏差响应

Fig. 17 Frequency deviation response of area 3

由图15–17可以看出, 传统PID、二维云模型PID受随机负荷扰动的影响较大, 频率波动激烈, 区域电力系统的频率稳定性较差. 二维云模型FOPID控制器能够有效跟踪区域的频率偏差信号, 减小频率偏差响应幅值, 使系统迅速恢复稳定, 具有较强的抗扰动能力, 电力系统的频率安全相比之下获得较大提升.

6 结论

本文提出了一种计及温控负荷响应的二维云模型分布式频率控制方法. 建立了多区域互联电力系统模型, 设计了一种基于FPES的温控负荷分布式控制策略, 考虑云模型理论与分数阶微积分理论, 设计了二维云模型FOPID控制器, 最后通过仿真分析与比较验证了在不同场景下所提出的温控负荷分布式控制策略和二维云模型FOPID控制器的有效性. 从仿真结果可以得出以下结论:

1) 本文所设计的基于FPES的温控负荷分布式控制策略应用在多区域互联电力系统的分布式控制中, 通过选取合适的调控因子, 可以充分利用温控负荷资源, 弥补负荷扰动的不确定性, 减轻调频机组工作负担, 有效保障区域电力系统的频率安全.

2) 本文所设计的二维云模型控制器,在针对阶跃负荷扰动和随机扰动时,可以快速跟踪频率偏差信号,具有更好的抗干扰性和鲁棒性。

3) 基于FPES的温控负荷分布式控制策略和二维云模型控制器的综合运用,能够对多区域电力系统的频率波动进行有效抑制,为多区域互联电力系统的频率控制提供了新的思路。

参考文献:

- [1] YU Yang, QUAN Li, JIA Yulong, et al. Improved model predictive control of aggregated thermostatically controlled load for power fluctuation suppression of new energy. *Electric Power Automation Equipment*, 2021, 41(3): 92 – 99.
(余洋, 权丽, 贾雨龙, 等. 平抑新能源功率波动的聚合温控负荷改进模型预测控制. 电力自动化设备, 2021, 41(3): 92 – 99.)
- [2] JIA Hongjie, MU Yunfei, HOU Kai, et al. Morphology evolution and operation regulation of urban energy system from perspective of energy transition. *Automation of Electric Power Systems*, 2021, 45(16): 49 – 62.
(贾宏杰, 穆云飞, 侯恺, 等. 能源转型视角下城市能源系统的形态演化及运行调控. 电力系统自动化, 2021, 45(16): 49 – 62.)
- [3] LI Cuiping, DONG Zheming, LI Junhui, et al. Control strategy of voltage regulation for distributed energy storage cluster in distribution network. *Automation of Electric Power Systems*, 2021, 45(4): 133 – 141.
(李翠萍, 东哲民, 李军徽, 等. 配电网分布式储能集群调压控制策略. 电力系统自动化, 2021, 45(4): 133 – 141.)
- [4] CHEN Laijun, WANG Yuyang, ZHENG Tianwen, et al. Consensus-based distributed control for parallel-connected virtual synchronous generator. *Control Theory & Applications*, 2017, 34(8): 1084 – 1091.
(陈来军, 王余阳, 郑天文, 等. 基于一致性的并联虚拟同步发电机分布式协同控制. 控制理论与应用, 2017, 34(8): 1084 – 1091.)
- [5] TANG Zhen, WANG Bing, LIU Weiyang, et al. Distributed control of offshore wind turbine group with input delay. *Control Theory & Applications*, 2020, 37(12): 2581 – 2590.
(唐桢, 王冰, 刘维扬, 等. 输入时滞的海上风电机组分布式控制. 控制理论与应用, 2020, 37(12): 2581 – 2590.)
- [6] ZHANG Yi, LIU Xiangjie. Robust distributed model predictive control for load frequency control of uncertain power systems. *Control Theory & Applications*, 2016, 33(5): 621 – 630.
(张怡, 刘向杰. 互联电力系统鲁棒分布式模型预测负荷频率控制. 控制理论与应用, 2016, 33(5): 621 – 630.)
- [7] TAN Wen, ZHOU Hong, FU Caifen. Linear active disturbance rejection control for load frequency control of power systems. *Control Theory & Applications*, 2013, 30(12): 1580 – 1588.
(谭文, 周宏, 傅彩芬. 负荷频率控制系统的线性自抗扰控制. 控制理论与应用, 2013, 30(12): 1580 – 1588.)
- [8] MI Yang, HAO Xuezhi, LIU Hongye, et al. Multi-area power system with wind power and energy storage system load frequency control based on sliding model control. *Control and Decision*, 2019, 34(2): 437 – 444.
(米阳, 郝学智, 刘红业, 等. 基于滑模控制的含风储多域电力系统负荷频率控制. 控制与决策, 2019, 34(2): 437 – 444.)
- [9] CHEN Shiming, LU Jiasheng, GAO Yanli. Neural network-based distributed adaptive control for power system transient stability. *Control and Decision*, 2021, 36(6): 1407 – 1414.
(陈世明, 卢家胜, 高彦丽. 基于神经网络的电力系统暂态稳定分布式自适应控制. 控制与决策, 2021, 36(6): 1407 – 1414.)
- [10] XIONG Linyun, WANG Jie. Study of load frequency control for three-area time-delayed power system. *Power System Technology*, 2018, 42(3): 894 – 902.
(熊林云, 王杰. 三区延迟电力系统鲁棒负荷频率控制研究. 电网技术, 2018, 42(3): 894 – 902.)
- [11] CAI Guowei, ZHANG Bin, WANG Jianyuan, et al. Application of cloud model theory to the load frequency control in interconnected power systems. *Proceedings of the CSEE*, 2015, 35(2): 353 – 358.
(蔡国伟, 张斌, 王建元, 等. 云模型理论在互联电力系统负荷频率控制中的应用. 中国电机工程学报, 2015, 35(2): 353 – 358.)
- [12] WANG Pei, ZHANG Jing, ZHANG Weiwei. Multi-granularity linguistic large group decision-making based on cloud model and multi-layer weight determination. *Control and Decision*, 2021, 36(9): 2257 – 2266.
(王佩, 张婧, 张威威. 基于云模型和多层权重求解的多粒度语言大群体决策方法. 控制与决策, 2021, 36(9): 2257 – 2266.)
- [13] SONDHI S, HOTE Y V. Fractional order PID controller for load frequency control. *Energy Conversion and Management*, 2014, 85(9): 343 – 353.
- [14] SONG M, SUN W, WANG Y F, et al. For transactive energy in power systems. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 2019, 11(3): 2452 – 2463.
- [15] LI Xiaomeng, JIA Hongjie, MU Yunfei, et al. Coordinated frequency control based on electric vehicles and heat pumps considering time-delay. *Electric Power Automation Equipment*, 2020, 40(4): 88 – 95, 110.
(李晓萌, 贾宏杰, 穆云飞, 等. 时滞环境下基于电动汽车与电热泵的协调频率控制. 电力自动化设备, 2020, 40(4): 88 – 95, 110.)
- [16] WANG Luping, LI Haozhi, XIE Xiaorong. A decentralized and coordinated control of emergency demand response to improve short-term frequency stability. *Proceedings of the CSEE*, 2020, 40(11): 3462 – 3470.
(王路平, 李浩志, 谢小荣. 提高短期频率稳定性的紧急需求响应分散协调控制方法. 中国电机工程学报, 2020, 40(11): 3462 – 3470.)
- [17] HU Z J, LIU S C, LUO W S, et al. Resilient distributed fuzzy load frequency regulation for power systems under cross-layer random denial-of-service attacks. *IEEE Transactions on Cybernetics*, 2020, DOI: 10.1109/TCYB.2020.3005283.
- [18] BAO Y Q, HU M Q, HONG Y Y, et al. Accuracy analysis and improvement of the state-queueing model for the thermostatically controlled loads. *IET Generation Transmission & Distribution*, 2017, 11(5): 1303 – 1310.
- [19] TROVATO V, TENG F, STRBAC G. Role and benefits of flexible thermostatically controlled loads in future low-carbon systems. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 2017, 9(5): 5067 – 5079.
- [20] ZHANG X S, WANG D Z, YU T, et al. Ensemble learning for optimal active power control of distributed energy resources and thermostatically controlled loads in an islanded microgrid. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2018, 43(49): 22474 – 22486.
- [21] XIANG Leijun, CHEN Hao, GUO Xinhua, et al. Secondary frequency control of multi-energy microgrid with electric vehicles based on fuzzy fractional-order PID. *Electric Power Automation Equipment*, 2021, 41(11): 74 – 80.
(项雷军, 陈昊, 郭新华, 等. 基于模糊分数阶PID的含电动汽车的多能源微电网二次频率控制. 电力自动化设备, 2021, 41(11): 74 – 80.)
- [22] YUMUK E, GUZELKAYA M, EKSIN I. Analytical fractional PID controller design based on Bode's ideal transfer function plus time delay. *ISA Transactions*, 2019, DOI: 10.1016/j.isatra.2019.01.034.

附录

表 A1 三区域电力系统基本参数

Table A1 Basic parameters of three-area power system

参数区域	区域1	区域2	区域3
调速器时间常数 T_g	0.7	0.9	1.5
汽轮机时间常数 T_t	1.7	1.2	0.9
调差系数 R	2.5	2.7	2.4
偏差系数 B	0.35	0.425	0.4
负荷阻尼系数 D	1	1.5	3
发电机惯性常数 $2H$	10	12	15
空调时间常数 T_{AC}	2500	2000	2200
理想温度区间 T	[22, 25]	[22, 25]	[22, 25]
联络线功率同步系数 T_{ij}	0.02	0.02	—

表 A2 ΔK_p 的控制规则表Table A2 ΔK_p control rules

云推理规则	E_c						
	NB	NM	NS	ZE	PS	PM	PB
E	NB	ZE	NS	NS	NS	NS	ZE
	NM	NS	ZE	ZE	ZE	PS	PS
	NS	NS	ZE	ZE	ZE	PS	PS
	ZE	NS	ZE	ZE	ZE	PS	PB
	PS	NS	ZE	ZE	ZE	PS	PS
	PM	NS	ZE	ZE	ZE	PS	PS
	PB	NB	NS	NS	PS	PS	ZE

表 A3 ΔK_i 的控制规则表Table A3 ΔK_i control rules

云推理规则	E_c						
	NB	NM	NS	ZE	PS	PM	PB
E	NB	ZE	ZE	ZE	ZE	ZE	ZE
	NM	NB	ZE	ZE	PS	PS	PS
	NS	PS	PS	PS	PS	ZE	PS
	ZE	NS	NS	NS	ZE	PS	NS
	PS	NB	ZE	ZE	PS	PS	PS
	PM	NB	ZE	ZE	PS	PS	PS
	PB	ZE	ZE	ZE	ZE	ZE	ZE

表 A4 ΔK_d 的控制规则表Table A4 ΔK_d control rules

云推理规则	E_c						
	NB	NM	NS	ZE	PS	PM	PB
E	NB	NS	NB	NB	NB	NB	NS
	NM	ZE	NS	NS	NB	NS	ZE
	NS	ZE	NS	NS	NB	NS	ZE
	ZE	ZE	NS	NS	NS	NS	ZE
	PS	ZE	ZE	ZE	ZE	ZE	ZE
	PM	ZE	ZE	ZE	ZE	ZE	ZE
	PB	PB	PS	PS	PS	PS	PB

表 A5 $\Delta \lambda$ 的控制规则表Table A5 $\Delta \lambda$ control rules

云推理规则	E_c						
	NB	NM	NS	ZE	PS	PM	PB
E	NB	NB	NS	NS	NS	NS	ZE
	NM	NS	NS	NS	NS	ZE	PS
	NS	NS	NS	NS	NS	ZE	PS
	ZE	NS	NS	NS	ZE	PS	PS
	PS	ZE	ZE	ZE	PS	PS	PS
	PM	ZE	PM	PM	PM	PM	PB
	PB	ZE	PS	PS	PS	PS	PB

表 A6 $\Delta \mu$ 的控制规则表Table A6 $\Delta \mu$ control rules

云推理规则	E_c						
	NB	NM	NS	ZE	PS	PM	PB
E	NB	PB	PB	PB	PB	PM	PS
	NM	PB	PB	PB	PM	PM	PS
	NS	PB	PB	PB	PM	PM	PS
	ZE	PB	PB	PM	PM	PS	ZE
	PS	PM	PM	PM	PS	ZE	NS
	PM	PM	PM	PS	ZE	ZE	NS
	PB	PM	PS	ZE	NS	NS	NS

作者简介:

项雷军 讲师, 目前研究方向为分布式控制与优化及其在智能电网中的应用, E-mail: ljxiang32@163.com;

陈 昊 硕士研究生, 目前研究方向为互联电力系统分布式优化控制, E-mail: chen hao987654@126.com;

聂卓赞 副教授, 目前研究方向为先进控制理论与应用、机器人与智能系统, E-mail: yezhuyun2004@sina.com.