

控制与决策

Control and Decision

非周期间歇控制下含风电能源的自动发电控制策略

杨兴旺, 刘斌, 刘勇, 傅志忠

引用本文:

杨兴旺, 刘斌, 刘勇, 等. 非周期间歇控制下含风电能源的自动发电控制策略[J]. *控制与决策*, 2024, 39(12): 4027–4036.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2023.1564>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

[一种具有非线性动力学模型的智能电网快速分布式控制](#)

A fast distributed control of smart grids with nonlinear dynamic model

控制与决策. 2021, 36(8): 1849–1854 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.1696>

[基于神经网络的电力系统暂态稳定分布式自适应控制](#)

Neural network-based distributed adaptive control for power system transient stability

控制与决策. 2021, 36(6): 1407–1414 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.1168>

[含混合储能的互联电力系统传感器容错负荷频率控制](#)

Sensor fault-tolerant load frequency control for multi-area interconnected power system with hybrid energy storage system

控制与决策. 2021, 36(5): 1069–1077 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.1432>

[并网逆变器分数阶虚拟惯性的虚拟同步发电机控制技术](#)

Virtual synchronous generator control technology with fractional virtual inertia for grid-connected inverters

控制与决策. 2021, 36(2): 463–468 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.0391>

[高超声速飞行器间歇故障改进自适应容错控制](#)

Improved adaptive fault-tolerant control of intermittent faults in hypersonic flight vehicle

控制与决策. 2021, 36(11): 2627–2636 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2020.0483>

非周期间歇控制下含风电能源的自动发电控制策略

杨兴旺¹, 刘斌^{1,2†}, 刘勇¹, 傅志忠³

(1. 湖南工业大学 电气与信息工程学院, 湖南 株洲 412000; 2. 湖南工业大学 理学院, 湖南 株洲 412000;
3. 湖南工业大学 轨道交通学院, 湖南 株洲 412000)

摘要: 研究风电并网下电力系统的负荷频率控制问题, 针对风电具有间歇性的问题提出基于非周期间歇控制的自动发电控制策略, 旨在既保证频率稳定性, 又节省控制资源. 首先, 建立风电作为可调度能源并且考虑不确定参数的自动发电控制系统, 通过自动发电控制系统进行电力系统的二次调频, 从而维持发电功率和负载功率的平衡; 其次, 将非周期间歇控制引入自动发电控制, 提出基于时间触发和基于事件触发的非周期间歇控制的自动发电控制策略; 同时, 借助 Lyapunov-like 函数证明了基于非周期间歇控制的自动发电控制系统的输入到状态稳定; 最后, 通过含风电、火电和水电发电单元的自动发电控制系统的仿真结果表明, 基于非周期间歇控制的自动发电控制策略能够在风电并网下维持电力系统的频率稳定, 并且能够有效降低控制成本和控制率.

关键词: 自动发电控制; 间歇控制; 事件触发控制; 频率稳定性; 输入到状态稳定; 控制率

中图分类号: TK81 文献标志码: A

DOI: 10.13195/j.kzyjc.2023.1564

引用格式: 杨兴旺, 刘斌, 刘勇, 等. 非周期间歇控制下含风电能源的自动发电控制策略 [J]. 控制与决策, 2024, 39(12): 4027-4036.

Automatic generation control strategy with wind power energy under non-periodic intermittent control

YANG Xing-wang¹, LIU Bin^{1,2†}, LIU Yong¹, FU Zhi-zhong³

(1. College of Electrical and Information Engineering, Hunan University of Technology, Zhuzhou 412000, China; 2. College of Science, Hunan University of Technology, Zhuzhou 412000, China; 3. College of Railway Transportation, Hunan University of Technology, Zhuzhou 412000, China)

Abstract: The load frequency control problem of power system under wind power grid connection is studied. Aiming at the intermittent problem of wind power, an automatic generation control strategy based on aperiodic intermittent control is proposed. The aim is to ensure frequency stability and save control resources. Firstly, an automatic generation control system with wind power as a schedulable energy source and considering uncertain parameters is established. The secondary frequency modulation of the power system is carried out by the automatic generation control system, so as to maintain the balance between power generation and load power. Then, the aperiodic intermittent control is introduced into the automatic generation control, and the automatic generation control strategy based on time-triggered and event-triggered aperiodic intermittent control is proposed. At the same time, the input-to-state stability of the automatic generation control system based on aperiodic intermittent control is proved by the Lyapunov-like function. Finally, the simulation results of the automatic generation control system with wind power, thermal power and hydropower generation units show that the automatic generation control strategy based on aperiodic intermittent control can maintain the frequency stability of the power system under wind power grid connection, and can effectively reduce the control cost and control rate.

Keywords: automatic generation control; intermittent control; event-triggered control; frequency stability; input-to-state stability; control rate

0 引言

自动发电控制 (AGC) 是指发电机组提供足够的可调整容量及一定的调节速率, 在允许的调节偏

差下实时跟踪频率变化, 以满足系统频率稳定的要求^[1]. 其主要目的是保证区域联络线偏差和频率偏差稳定, 是电力系统频率控制不可或缺的主要手段之

收稿日期: 2023-11-09; 录用日期: 2024-03-19.

基金项目: 国家自然科学基金项目 (62073132).

责任编委: 卢剑权.

†通讯作者. E-mail: liubin@hut.edu.cn.

一^[2].但是,近些年可再生能源将会日益渗透在电力系统中^[3].由于化石燃料资源的消耗和其利用时产生的问题,可再生能源正在成为发电能源的核心,风电单元在可再生发电单元中占比最高.但由于风力具有随机性和间歇性,导致风力发电机组不能总是实现合适地跟踪和调节电力系统的频率,给电力系统频率控制带来巨大的挑战.如何应对风电具有的随机性和间歇性,评估和保障系统输出的安全性和经济性,成为保障新能源利用的重要问题^[4].

针对含风电的AGC提出了许多控制策略.文献[5]针对风电参与电力系统调频问题,提出一种同时考虑功率与频率变化的自适应动态功率调节控制策略,将自适应控制引入AGC中,能够及时发现并响应系统的参数变化,自动调整AGC控制器的参数.但自适应控制系统的建模复杂,需要对一些系统参数进行在线辨识和校正,计算量较大,导致在控制时的实时性能不佳.文献[6]设计了一种基于交替方向乘子法的分布式模型预测控制框架来完成风电场功率控制,但模型预测控制的计算量大,耗时长.文献[7]从AGC角度提出一种改进的强化学习算法,用于解决大型电动汽车与风电并网引起的强随机扰动导致电力系统频率不稳定的问题.但强化学习需要大量的计算资源和事件来训练,特别是在处理复杂任务时,需要额外的计算资源.将非周期间歇控制(APIC)引入含风电的AGC系统中,即可实现当发电功率和负荷功率不平衡时对系统施加控制,当发电功率与负荷频率平衡时去除对系统的控制.然而,目前利用APIC来研究含风电的AGC问题的文献很少,这是本文的动机之一.

在文献[8]中针对连续时间动力系统的指数稳定性提出了基于时间触发的APIC(T-APIC)和基于事件触发的APIC(E-APIC),在T-APIC条件下,通过提出最小平均控制宽度的概念,利用Lyapunov-like函数的方法,导出了用逆平均逗留时间条件(C-ADT)表示的指数稳定准则,基于阈值和检查周期的指标,提出E-APIC.文献[9-11]引入事件触发控制策略来节省系统的控制资源.将事件触发与APIC相结合不仅能够实现系统的稳定性还可以更大程度地节约控制资源.文献[12]针对多智能体系统的分布式优化问题,提出一种新的事件触发非周期间歇通讯控制方法,并研究该控制方法下系统的固定时间收敛性.在文献[13-14]中研究了E-APIC在微电网负荷频率控制中的应用.但上述两篇文献由于实际电力系统负荷频率控制系统比较复杂,简化了其数学模型.由于

风电具有的特性,简化的数学模型不能很好地贴合含风电的电力系统的负荷频率控制系统,这种随机性需加以考虑,这也是本文的另一个动机.

基于上述情况,提出基于APIC的AGC策略.本文的主要工作如下:

1) 选取火电、水电和风电作为AGC的发电单元,相比将风电单元作为负荷扰动并入火电单元的传统并网模式,采用将风电作为可调度能源单位并入AGC系统中,在数学模型中加入不确定项,可使数学模型进一步贴合实际的电力系统.

2) 针对风电的间歇性问题,根据C-ADT设计了T-APIC,根据阈值和检查周期设计了E-APIC,为含风电的AGC系统提供一种新的控制策略.

3) 由于风电能源的加入,对AGC系统具有极大的影响.为了与实际情况更加贴近,本文放宽以往在线性矩阵不等式中对AGC系统中负荷扰动的限制,对AGC系统做出更一般的假设.将T-APIC和E-APIC方案扩展到输入状态稳定(ISS).

1 系统模型描述

1.1 多发电单元AGC系统模型

文献[15]指出对于区域控制偏差(area control error, ACE)有3种计算方法,本文选取联络线频率偏差的计算方法.对于多发电单元的AGC系统而言,需要考虑发电单元之间联络线的影响.发电单元参数变量见表1,图1为联络线模型框图.

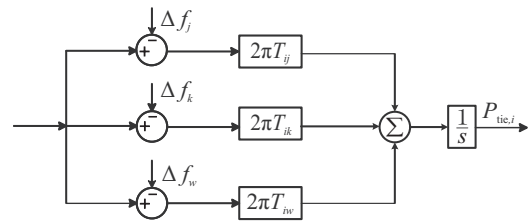


图1 联络线模型框图

由图1可以得到多发电单元的AGC系统联络线交换功率,结合联络线频率即可得到偏差控制

$$\begin{cases} \Delta \dot{P}_{tie,i} = 2\pi \sum_{j=1, i \neq j}^n T_{ij} (\Delta f_i - \Delta f_j); \\ ACE_i = K_{Bi} \Delta f_i + \Delta P_{tie,i}. \end{cases} \quad (1)$$

假设两个区域之间的联络线功率交换系数是相等的,即 $T_{ij} = T_{ji}$,同时每个控制区域之间的联络线交换功率需满足

$$\sum_{i=1}^n \Delta P_{u_{tie}} = 0. \quad (2)$$

在现代控制理论中,一般情况下并不能构建精准

表1 发电单元参数变量

参数变量	描述	参数变量	描述	参数变量	描述
Δf	区域频率偏差	T_p	电力系统时间常数	T_{ij}	区域之间的互联增益
$\Delta\omega_g$	风电机转子速度偏差	K_p	电力系统增益	K_B	频率偏差因子
ΔP_g	发电机输出偏差	N_g	齿轮箱比率	B_θ	低速轴内的等效阻尼系数
$\Delta X_g, \Delta X_{gh}$	调节阀位置偏差	T_r	再热时间常数	v	有效风速
ΔP_r	再热涡轮机输出功率偏差	T_T	汽轮机时间常数	R	调差系数
ΔP_d	负荷扰动	K_r	再热汽轮机增益	β	桨距角
$\Delta\theta$	风机桨距角偏差	T_G	火力调速器时间常数	η	发电与实际功率转换系数
$\Delta\omega_r$	风轮角速度偏差	T_W, T_R	水力启动时间常数	λ	叶尖速比
ΔP_{tie}	联络线有功功率偏差	T_1, T_2	水力调速器时间常数	$T_{g,0}$	平衡点处发电机转矩
P_{ci}	火、水电厂控制信号	J_g	发电机侧的转动惯性	N_g	齿轮箱比率
ACE	区域控制误差	$S_{w,n}$	风电区域额定容量	J_r	转子侧的转动惯性

的数学模型,只能给出一个简化的模型来描述,精确的数学模型和简化的数学模型之间的差异称为模型结构的不确定性^[16]。为提高被控对象的性能,本文考虑模型的不确定性,多区域发电单元的状态方程可表述为

$$\begin{cases} \dot{x}(t) = Ax(t) + \Delta Ax(t) + Bu(t) + F\omega(t), \\ y(t) = Cx(t). \end{cases} \quad (3)$$

其中: x 表示状态向量, $x(t) = [x_1(t), x_2(t), \dots, x_n(t)]$; y 表示输出向量, $y(t) = [y_1(t), y_2(t), \dots, y_n(t)]$; u 表示控制输入, $u(t) = [u_1(t), u_2(t), \dots, u_n(t)]$; ω 表示扰动输入, $\omega(t) = [\omega_1(t), \omega_2(t), \dots, \omega_n(t)]$; A, B, F, C 为系数矩阵, $A = (A_{ij})_{n \times n}$, $B = \text{diag}\{B_1, B_2, \dots, B_n\}$, $C = \text{diag}\{C_1, C_2, \dots, C_n\}$, $F = \text{diag}\{F_1, F_2, \dots, F_n\}$; ΔA 为不确定参数矩阵。定义 i 为多发电单元的AGC系统中第 i 个发电单元, j 为与 i 相邻的发电单元,即 $i = j = 1, 2, \dots, n$,且 A_{ii} 表示第 i 个发电单元的系数矩阵, A_{ij} 表示各发电单元互联时的交换功率。

1.2 火力发电单元模型

火力发电单元由调速子系统、再热延时子系统、汽轮机组和电力系统组成^[17],如图2所示。

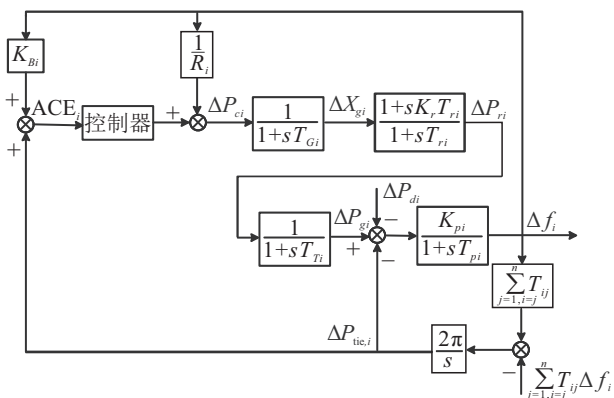


图2 火力发电单元模型

由图2可以直接推导出状态空间模型

$$x_{ai}(t) =$$

$$[\Delta f_i(t) \quad \Delta P_{gi}(t) \quad \Delta P_{ri}(t) \quad \Delta X_{gi}(t) \quad \Delta P_{tie,i}(t)],$$

$$u_{ai} = [\Delta P_{ci}], \omega_{ai} = [\Delta P_{di}].$$

火电机组系数矩阵为

$$A_{aa} = \begin{bmatrix} -\frac{1}{T_{pi}} & \frac{K_{pi}}{T_{pi}} & 0 & 0 & -\frac{K_{pi}}{T_{pi}} \\ 0 & -\frac{1}{T_{Ti}} & \frac{1}{T_{Ti}} & 0 & 0 \\ -\frac{K_{ri}}{T_{Gi}R_i} & 0 & -\frac{1}{T_{ri}} & \frac{T_{Gi} - K_{ri}T_{ri}}{T_{Gi}T_{ri}} & 0 \\ -\frac{1}{T_{Gi}R_i} & 0 & 0 & -\frac{1}{T_{Gi}} & 0 \\ 2\pi \sum_{j=1, j \neq i}^n T_{ij} & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix},$$

$$B_{aa} = [0 \ 0 \ 0 \ \frac{1}{T_{gi}} \ 0]^T, C_{aa} = \begin{bmatrix} K_B & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix},$$

$$F_{aa} = [-\frac{K_{pi}}{T_{pi}} \ 0 \ 0 \ 0 \ 0]^T.$$

1.3 水力发电单元模型

水力发电单元由调速子系统、水轮机系统、水锤动力子系统和动力系统组成^[17],如图3所示。

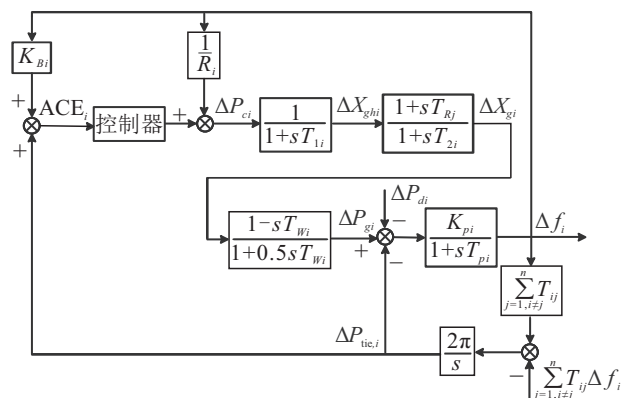


图3 水力发电单元模型

由图3可以直接推导出状态空间模型

$$x_{bi}(t) = [\Delta f_i(t) \ \Delta P_{gi}(t) \ \Delta X_{gi}(t) \ \Delta X_{ghi}(t) \ \Delta P_{tie,i}(t)],$$

$$u_{ai} = [\Delta P_{ci}], \ \omega_{bi} = [\Delta P_{di}].$$

水电机组系数矩阵为

$$A_{bb} = \begin{bmatrix} -\frac{1}{T_{pi}} & \frac{K_{pi}}{T_{pi}} & 0 & 0 & -\frac{K_{pi}}{T_{pi}} \\ 2j & -\frac{2}{T_{Wi}} & 2i & 2\ell & 0 \\ -j & 0 & -\frac{1}{T_{2i}} & -\ell & 0 \\ -\frac{1}{T_{1i}R_i} & 0 & 0 & -\frac{1}{T_{1i}} & 0 \\ 2\pi \sum_{j=1, j \neq i}^n T_{ij} & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix},$$

$$B_{bb} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & \frac{1}{T_{1i}} & 0 \end{bmatrix}^T, \ C_{bb} = \begin{bmatrix} K_B & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix},$$

$$F_{bb} = \begin{bmatrix} -\frac{K_{pi}}{T_{pi}} & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}^T.$$

其中

$$j = \frac{T_{Ri}}{T_{1i}T_{2i}R_i}, \ \ell = \frac{T_{Ri} - T_{1i}}{T_{1i}T_{2i}}, \ i = \frac{T_{2i} + T_{Wi}}{T_{2i}T_{Wi}}.$$

1.4 风力发电单元模型

本文采用美国国家可再生能源实验室(NREL)设计研发的一类海上风电机组^[18],后续用该经典模型进行设计与仿真.

风轮转矩可以表示为

$$T_r = \frac{P_r}{\omega_r} = \frac{1}{2\omega_r} \pi \rho R^2 v^3 C_p(\beta, \lambda(v, \omega_r)), \quad (4)$$

$$T_r = T_{r,0} + \varphi_1 \Delta v + \varphi_2 \beta + \varphi_3 \Delta \omega_r, \quad (5)$$

其中 $\varphi_1, \varphi_2, \varphi_3$ 是稳态工作点下 T_r 对 v, β, ω_r 的偏导数.

由图4可以直接推导出如下状态空间模型:

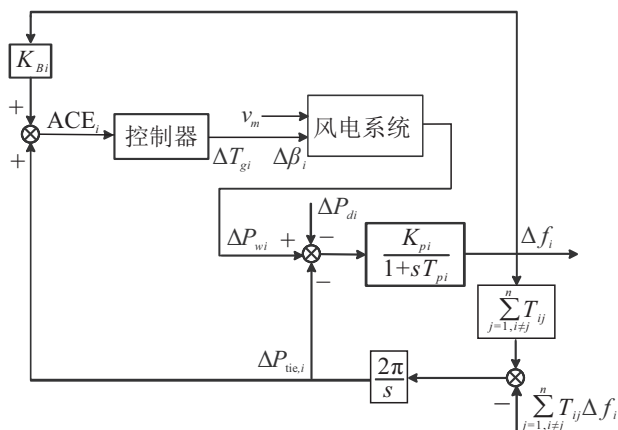


图4 风力发电单元模型

$$x_{ci}(t) = [\Delta f_i(t) \ \Delta \omega_{gi}(t) \ \Delta \omega_{ri}(t) \ \Delta \theta_i(t) \ \Delta P_{tie,i}(t)],$$

$$u_{bi} = [\Delta \beta \ \Delta T_{gi}], \ \omega_{ci} = [\Delta P_{di} \ \Delta v].$$

风电机组系数矩阵为

$$A_{cc} = \begin{bmatrix} -\frac{1}{T_{pi}} & \frac{K_{pi}\eta_i T_{gi,0}}{T_{pi}S_{w,n}} & 0 & 0 & -\frac{K_{pi}}{T_{pi}} \\ 0 & -\frac{B_{\theta i}}{J_{gi}N_{gi}^2} & \frac{B_{\theta i}}{J_{gi}N_{gi}} & \frac{K_{\theta i}}{J_{gi}N_{gi}} & 0 \\ 0 & \frac{B_{\theta i}}{J_{gi}N_{gi}} & \frac{\varphi_3 - B_{\theta i}}{J_{ri}} & -\frac{K_{\theta i}}{J_{ri}} & 0 \\ 0 & -\frac{1}{N_{gi}} & 1 & 0 & 0 \\ 2\pi \sum_{j=1, j \neq i}^n T_{ij} & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix},$$

$$B_{cc} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & \frac{\varphi_2}{J_{ri}} & 0 & 0 \end{bmatrix}^T,$$

$$C_{cc} = \begin{bmatrix} K_B & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix},$$

$$F_{cc} = \begin{bmatrix} -\frac{K_{pi}}{T_{pi}} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{\varphi_1}{J_{ri}} & 0 & 0 \end{bmatrix}^T.$$

2 控制方案设计

在实际系统中,控制方案大部分都是连续的.然而,从实际环境考虑这些控制方法会造成资源的不必要浪费.如果能做到在系统不稳定时对系统施加控制,并且在系统稳定运行后去除控制,则能够节约控制成本.不仅如此,由于风电具有间歇性,这时如果对系统采用连续控制,不仅会造成资源不必要的浪费,还会给控制器带来压力.选择APIC进行研究不仅能够保证系统的稳定性,还能够节约控制成本.

采用ACE作为负荷频率控制器的控制输入信号,可以得到如下的PI控制器:

$$u(t) = -K_P ACE - K_I \int ACE dt. \quad (6)$$

考虑风电并入下的AGC系统(3)和PI控制器(6),可以得到系统实际的控制信号为 $u(t) = KCx(t)$.其中: K 为控制增益矩阵, $Cx(t)$ 为系统的控制输入.

APIC可以根据触发规则分为T-APIC和E-APIC,对于任意一个控制 $\{u(t), t_s, \tau_s\}$, t_s 表示第 s 次控制的开始时刻, τ_s 表示在 $[t_s, t_{s+1})$ 的时间间隔内的控制宽度. APIC的控制形式为

$$u(t) = \begin{cases} KCx(t), & t_s \leq t < t_s + \tau_s; \\ 0, & t_s + \tau \leq t < t_{s+1}. \end{cases} \quad (7)$$

2.1 基于时间触发的非周期间歇控制的控制形式

T-APIC 触发规则仅与时间有关,与状态无关,其控制触发时间 t_s 被设置为满足 C-ADT 条件. 当控制系统满足 C-ADT 时,控制系统是指数稳定的,其中 C-ADT 要满足: $\exists \alpha \in (0, g_1)$ 和 $\beta \geq 0$ 使得

$$N_a \geq \frac{t - t_0}{\frac{g_1 + g_2}{\alpha + g_2} \bar{\tau}} - \beta. \quad (8)$$

其中: $N_a(t)$ 为控制次数, $\bar{\tau}$ 为平均控制宽度.

2.2 基于事件触发的非周期间歇控制的控制形式

C-ADT 条件可能不易被检测,并且 T-APIC 对时间具有依赖性,所以引入 E-APIC. E-APIC 方案基于两个指标: 阈值 $\sigma_{\max} > 1$ 和检查周期 $\Delta > 0$, 结合事件触发方案来判断下一次控制触发时刻是否需要在检查周期内被更新.

$$\forall t > s \geq 0, s < \theta \leq t,$$

$$\Psi(s, t) \triangleq [X(x(\theta)) \geq \sigma_{\max} V(x(s))]. \quad (9)$$

根据事件触发方案(9), E-APIC 的 t_{s+1} 为

$$t_{s+1} = \begin{cases} \min[t : t \in \Psi_s(t_s + \tau_s, t_s + \Delta)], \\ \Psi_s(t_s + \tau_s + \Delta) \neq \emptyset; \\ t_s + \Delta, \Psi_s(t_s + \tau_s, t_s + \Delta) = \emptyset. \end{cases} \quad (10)$$

τ_s 和最小平均控制宽度 $\bar{\tau}$ 满足

$$\frac{\ln \sigma_{\max}}{g_1} < \bar{\tau} \leq \tau_s \leq \Delta - \frac{\ln \sigma_{\max}}{g_2}. \quad (11)$$

3 控制参数设计及其稳定性分析

本节将利用 Lyapunov-like 函数分析基于 APIC 的 AGC 系统在含有不确定参数情况下的稳定性. 由于风电加入系统,本节中放宽以往在线性矩阵不等式中对 AGC 系统中负荷扰动的限制,对 AGC 系统中的负荷扰动做出了更一般的假设,将 T-APIC 和 E-APIC 方案扩展到基于输入状态稳定 (ISS), 设计了 T-APIC-ISS 和 E-APIC-ISS 方案^[19].

考虑风电并入下 AGC 系统状态方程

$$\dot{x}(t) = Ax(t) + Bu(t) + F\omega(t) + f(x(t)). \quad (12)$$

假设式(12)的解唯一存在,且对于所有给定的初始条件,控制输入 u 和扰动 $\omega(t)$ 都是正向完备, $f(x(t)) = \Delta Ax(t)$. 设 $x(t) = x(t, t_0, x_0)$ 表示具有初始条件 $x(t_0) = x_0$ 的式(12)的解.

3.1 APIC-ISS 方案

系统在 APIC 的控制下状态方程为

$$x(t) = \begin{cases} (A + BKC)x(t) + F\omega(t) + f(x(t)), \\ \forall t \in [t_s, t_s + \tau_s); \\ Ax(t) + F\omega(t) + f(x(t)), \\ \forall t \in [t_s + \tau_s, t_{s+1}). \end{cases} \quad (13)$$

定义1 如果系统(13)是 ISS 指数稳定的,即存在在一个常数 $a > 0, v > 0$ 和 $\phi \in k_\infty$, 则当 $t \geq t_0$ 使得系统(13)的解满足

$$\|x(t)\| \leq v\|x_0\|e^{-a(t-t_0)} + \phi(\|F\omega(t)\|_{[t_0, t]}). \quad (14)$$

假设1 假设 f 满足 Lipschitz 条件: 对于一些 $l^* > 0, \|f(x) - f(y)\| \leq l^*\|x - y\|, \forall x, y \in R^n$, 并且对于矩阵 $P > 0, K$ 和常数 $g_1, g_2 > 0, \mu_2 > \mu_1 > 0, \mu^* = \sqrt{\mu_2/\mu_1}$ 满足线性矩阵不等式 LMI

$$\mu_1 I \leq P \leq \mu_2 I, \quad (15)$$

$$P(A + BKC) + (A + BKC)^T P + (2l^*u^* + g_1)P \leq 0, \quad (16)$$

$$PA + A^T P + (2l^*u^* + g_2)P \leq 0. \quad (17)$$

为了稳定系统,对于 K 的设计需要满足假设1. 根据假设1中的 Lipschitz 条件,式(13)具有唯一解且正向完备. 因此, t_s 需满足 non-Zeno 条件

$$t_{s+1} > t_s, \forall s \in N; \lim_{t \rightarrow \infty} t_s = \infty. \quad (18)$$

当 t_s 满足式(18)时,考虑 τ_s , 假设 τ_s 满足非平凡条件

$$0 < \tau_s < \Delta_s \triangleq t_{s+1} - t_s, \forall s \in N, \tau_{\max} < \infty. \quad (19)$$

因此,基于 APIC 控制的系统问题可表述为一个最小激活时间率问题,即

$$R_{\min} = \min_{\{t_s\}\{\tau_s\}} \left\{ \lim_{s \rightarrow \infty} \frac{\sum_{m=0}^s \tau_s}{\sum_{m=0}^s \Delta_s} \right\}. \quad (20)$$

下面将对 T-APIC 和 E-APIC 的 R_{\min} 进行估计,通过引入 R_u^* 来简化计算, $R_u^* \triangleq \frac{g_2}{g_1 + g_2}$.

3.2 T-APIC-ISS 方案

定理1 设假设1成立,并且 t_s 满足式(18). 如果 τ_s 满足式(19)和如下条件:

$$R_u^* = \frac{g_2}{g_1 + g_2} < r_{\inf} = \inf_{i \in N} \left\{ \frac{\tau_s}{\Delta_s} \right\} < 1, \quad (21)$$

则可以说系统(12)在 T-APIC 下 ISS 指数稳定.

$$R_{\min} = \min_{\{t_s\}\{\tau_s\}} \left\{ \lim_{s \rightarrow \infty} \frac{\sum_{m=0}^s \tau_s}{\sum_{m=0}^s \Delta_s} \right\} > R_u^*. \quad (22)$$

证明 选取 Lyapunov-like 函数为 $V(x) = x^T P x$.

当 $t_s \leq t < t_s + \tau_s$ 时, 根据式(13)和(16), 对于某些 ϵ_1 满足 $0 < \epsilon_1 < g_1$, 有

$$V(x(t)) \leq V(x(t_s)) e^{-\tilde{g}_1(t-t_s)} + \zeta_1 \|F\omega(t)\|^2. \quad (23)$$

其中: $\tilde{g}_1 = g_1 - \epsilon_1$, $\zeta_1 = \epsilon_1^{-1} \tilde{g}_1^{-1} \lambda_{\max}(P)$.

对于 $t_s + \tau_s \leq t < t_{s+1}$, 通过式(17)可得

$$V(x(t)) \leq V(x(t_s + \tau_s)) e^{\tilde{g}_2(t-t_s-\tau_s)} + \zeta_2 e^{\tilde{g}_2(t-t_s-\tau_s)} \|F\omega(t)\|_{[t_s+\tau_s, t]}^2. \quad (24)$$

其中: $\tilde{g}_2 = g_2 + \epsilon_2$, $\zeta_2 = \epsilon_2^{-1} \tilde{g}_2^{-1} \lambda_{\max}(P)$.

令 $\zeta \triangleq \zeta_1 + \zeta_2$ 和 $h_{sm} \triangleq -(\tilde{g}_1 + \tilde{g}_2) \sum_{l=m}^{s-1} \tau_l + \tilde{g}_2(t - t_m)$, 根据式(23)和(24)可得

$$V(x(t_{s+1})) \leq V(x(t_0)) e^{h_{s+1,0}(t_s+1)} + \zeta \sum_{m=0}^s e^{\tilde{g}_1 \tau_m + h_{s+1,m}(t_s+1)} \|F\omega(t)\|_{[t_0, t_s+1]}^2. \quad (25)$$

根据式(23)~(25), 对于 $t_s \leq t \leq t_s + \tau_s$, 有

$$V(x(t)) \leq V(x_0) e^{h_{s,0}(t)} + \left(\zeta_1 + \zeta \sum_{m=0}^{s-1} e^{\tilde{g}_1 \tau_m + h_{s,m}(t)} \right) \|F\omega(t)\|_{[t_0, t]}^2. \quad (26)$$

并且根据式(24)和(25), 对于 $t_s + \tau_s \leq t \leq t_{s+1}$, 有

$$V(x(t)) \leq V(x_0) e^{h_{s+1,0}(t)} + \zeta \sum_{m=0}^s e^{\tilde{g}_1 \tau_m + h_{s+1,m}(t)} \|F\omega(t)\|_{[t_0, t]}^2. \quad (27)$$

令 τ_s 满足式(19)和(21), 通过式(26)和(27), 稳定主要依赖 $h_{sm}(t)$, 用式(21)来估计 $h_{sm}(t)$, 存在 $a \in (0, g_1)$,

$$r_{\inf} = \inf_{i \in N} \left\{ \frac{\tau_s}{\Delta_s} \right\} = \frac{a + g_2}{g_1 + g_2}. \quad (28)$$

对于 $a \in (0, g_1)$, 使得 ϵ_1 和 ϵ_2 满足 $\epsilon_1 = \epsilon_2 = \epsilon < a < g_1$, 并且 $\tilde{a} = a - \epsilon$. 因此, 通过式(28)有 $\tilde{a} > 0$ 且满足

$$\frac{a + g_2}{g_1 + g_2} = \frac{\tilde{a} + \tilde{g}_2}{\tilde{g}_1 + \tilde{g}_2} = r_{\inf} \leq \frac{\tau_s}{\Delta_s}, \quad \forall s \in N. \quad (29)$$

由式(29)可知, 对于 $\forall t \in [t_s, t_s + \tau_s]$ 且 $s > m$, 有

$$h_{sm}(t) \leq -\tilde{a}(t - t_m) + (\tilde{a} + \tilde{g}_2)\tau_s, \quad t \in [t_s, t_s + \tau_s]. \quad (30)$$

对于 $\forall t \in [t_s + \tau_s, t_{s+1}]$ 且 $s \geq m$, 有

$$h_{s+1,m}(t) \leq h_{s+1,m}(t_{s+1}) \leq -\tilde{a}(s+1-m). \quad (31)$$

由式(30)、(31)、(26)、(27)和(15), 对于 $\forall t \geq t_0$, 有

$$\|x(t)\| \leq \sqrt{\frac{\mu_2}{\mu_1}} \sqrt{\eta_0} \|x_0\| e^{-\frac{\tilde{a}(t-t_0)}{2}} +$$

$$\sqrt{\eta_1} \|F\omega(t)\|_{[t_0, t]}. \quad (32)$$

其中: $\eta_0 = e^{(\tilde{a} + \tilde{g}_2)\tau_{\max}}$, $\eta_1 = \zeta \left(1 + \frac{e^{\tilde{g}_1 \tau_{\max}}}{1 - e^{-\tilde{a} \tau_{\min}}} \right)$.

综上, 系统(12)在 T-APIC 下 ISS 指数稳定. \square

定理2 令假设1成立, 对于任意给定的 τ_s 满足式(19), 如果 t_s 满足式(18)以及下列任意一个条件:

$$(R_u^*)^{-1} > r_{\inf}^{-1} > 1, \quad (33)$$

$$\tau_s < \Delta_s \leq \frac{g_1 + g_2}{a + g_2} \tau_s, \quad \forall s \in N, \quad 0 < a < g_1. \quad (34)$$

证明过程类似定理1, 此处略.

3.3 E-APIC-ISS 方案

假设2 令假设1与矩阵 K 成立, E-APIC 基于阈值 $\sigma_{\max} > 1$ 和检查周期 $\Delta > 0$ 两个指标, E-APIC 中 $\{t_s\}$ 和 $\{\tau_s\}$ 需满足式(10)和(11).

对于某些 $0 < \epsilon < g_1$, $\tilde{g}_1 = g_1 - \epsilon$, $\tilde{g}_2 = g_2 + \epsilon$, $\Psi_s(s, t) \triangleq \{V(x(\theta)) \geq \sigma_{\max} V(x(s)) + \eta_{\omega} \|F\omega\|_{[s, \theta]}^2\}$ 存在 Lyapunov 函数 $V(x) = x^T P x$, 其中 η_{ω} 满足 $\eta_{\omega} \geq \max \left\{ \frac{\epsilon^{-1} \lambda_{\max}(P)}{\tilde{g}_1}, \frac{\epsilon^{-1} \lambda_{\max}(P)}{\tilde{g}_2} \right\}$.

定理3 设假设1成立. 若式(12)通过 E-APIC(10)和(11)ISS 指数稳定, 则其 E-APIC 的最小激活时间率 R_{\min} 需满足

$$\frac{\tau_{\min}}{\Delta} \leq R_{\min} \leq \frac{\tilde{g}_2^*}{\tilde{g}_1 + \tilde{g}_2^*} \frac{\tilde{g}_1 \tau_{\min}}{\ln \sigma_{\max}}, \quad (35)$$

其中 $\tilde{g}_2^* = \tilde{g}_2 + \epsilon^{-1} \eta_{\omega}^{-1} \lambda_{\max}(P)$.

证明 由式(10)和(11)可得 $0 < \tau_{\min} \leq \tau_s < \Delta_s = t_{s+1} - t_s$. 因此, t_s 是 non-zeno 且 τ_s 是非平凡的.

对于 $t \in [t_s + \tau_s, t_{s+1}]$, $u(t) = 0$, 可得

$$\dot{V}(x) \leq \tilde{g}_2 V(x) + \epsilon_2^{-1} \lambda_{\max}(P) \|F\omega(t)\|^2. \quad (36)$$

由式(36), 任何的 $V(x(t)) \geq \eta_{\omega} \|F\omega(t)\|^2$, 都有 $\dot{V}(x(t)) \leq \tilde{g}_2^* V(x(t))$, 且

$$V(x(t_{s+1})) \leq e^{\tilde{g}_2^*(t_{s+1}-t_s-\tau_s)} V(x(t_s + \tau_s)) + \eta_{\omega} \|F\omega(t)\|_{[t_s+\tau_s, t_{s+1}]}^2. \quad (37)$$

由式(10)和(11), 如果 $\Psi_s(t_s + \tau_s, t_s + \Delta) \neq \emptyset$, $t_{s+1} \leq t_s + \Delta$, 则通过 $V(x(t))$ 的连续性可以得到

$$V(x(t_{s+1})) = \sigma_{\max} V(x(t_s + \tau_s)) + \eta_{\omega} \|F\omega(t)\|_{[t_s+\tau_s, t_{s+1}]}^2. \quad (38)$$

由式(37)和(38)可以得到 $\forall s \in N$, 有

$$0 < \frac{\ln \sigma_{\max}}{\tilde{g}_2^*} \leq t_{s+1} - t_s - \tau_s \leq \Delta - \tau_{\min}. \quad (39)$$

另一方面, 如果 $\Psi_s(t_s + \tau_s, t_s + \Delta) = \emptyset$, $t_{s+1} \leq t_s + \Delta$, 则 $t_{s+1} = t_s + \Delta$. 由式(11)可得 $0 < \frac{\ln \sigma_{\max}}{\tilde{g}_1^*} < \frac{\ln \sigma_{\max}}{\tilde{g}_2^*} \leq \Delta - \tau_s = t_{s+1} - t_s - \tau_s \leq \Delta - \tau_{\min}$, 式(39)

总成立,由式(39)和(11)可得

$$0 < \left(\frac{1}{\tilde{g}_1} + \frac{1}{\tilde{g}_2^*} \right) \ln \sigma_{\max} \leq t_{s+1} - t_s \leq \Delta. \quad (40)$$

因为 $u(t) = KCx(t), \forall t \in [t_s, t_s + \tau_s]$. 由式(23)可以得到

$$V(x(t_s + \tau_s)) \leq e^{\tilde{g}_1 \tau_s} V(x(t_s)) + \zeta_1 \|F\omega(t)\|_{[t_s, t_s + \tau_s]}^2. \quad (41)$$

令 $\eta = \max\{\zeta_1, \eta_\omega\}$, 由式(10)、(36)和(41)可以得到, $\forall s \in N$, 有

$$V(x(t)) \leq \sigma_{\max} V(x(t_s + \tau_s)) + \eta \|F\omega(t)\|_{[t_s + \tau_s, t_s]}^2, \quad (42)$$

$$V(x(t)) \leq \sigma_{\max} V(x(t_s)) + \eta \|F\omega(t)\|_{[t_s, t_s + 1]}^2. \quad (43)$$

令 $a_s = V(x(t_s))$ 且 $q_s = \sigma_{\max} e^{-\tilde{g}_1 \tau_s}, \forall s \in N$. 定义 $\tilde{\eta} = \eta + \sigma_{\max} \zeta_1$, 由式(41)~(43)可以得到

$$a_{s+1} \leq q_s a_s + \tilde{\eta} \|F\omega(t)\|_{[t_s, t_s + 1]}^2, \quad \forall s \in N. \quad (44)$$

由式(11)和(44)以及 $\tau_{\min} \leq t_s$, 可以得到

$$a_s \leq e^{\sum_{m=0}^{s-1} (-\tilde{g}_1 \tau_m + \ln \sigma_{\max})} a_0 + \tilde{\eta} \left(1 + \sum_{m=1}^{s-1} e^{\sum_{l=m}^{s-1} (-\tilde{g}_1 \tau_l + \ln \sigma_{\max})} \right) \|F\omega(t)\|_{[t_0, t_s]}^2 \leq e^{-as} a_0 + \tilde{\eta}^* \|F\omega(t)\|_{[t_0, t_s]}^2, \quad \forall s \in N. \quad (45)$$

其中: $a \triangleq \tilde{g}_1 \tau_{\min} - \ln \sigma_{\max} > 0$ 且 $\tilde{\eta}^* = \tilde{\eta} (1 - e^{-a})^{-1}$.

因此,由式(42)、(43)、(45)和(40),对于 $t \geq t_0$ 可以得到

$$\|x(t)\| \leq \sqrt{\frac{\mu_2 \sigma_{\max} e^a}{\mu_1}} e^{-\frac{a}{\Delta}(t-t_0)} \|x_0\| + \sqrt{\frac{\tilde{\eta} + \tilde{\eta}^*}{\mu_1}} \|F\omega(t)\|_{[t_0, t]}, \quad \forall t \geq t_0. \quad (46)$$

综上,系统(12)在E-APIC下时ISS指数稳定. \square

4 仿真案例

仿真1~仿真3采用数值仿真,选取一风、一水和一火三发电单元的AGC系统,比较不同风电并网方式和不同控制策略的性能. 仿真4以IEEE39节点系统为例进行分析,将其分为两个区域进行仿真验证. 根据文献给出如表2所示系统参数.

为了方便比较,在所有仿真中使用以下的控制参数: $K_1 = [-0.2, 0.3], K_2 = [-0.2, 0.6], K_3 = [-0.3, 0.2; -0.2, 0.4]$ (除PID控制和滑膜控制); 仿真总时长为40s, $T_{12} = T_{21} = 0.2, T_{13} = T_{31} = 0.25, T_{23} = T_{32} = 0.12, \tau = 1.5$; 干扰 $\omega(t) = 0.1 \times \text{rand}(1) \times \cos t \times \Delta f$. 为了更加直观比较出各控制方案的性能,仿真采用状态量的均差.

表2 发电单元参数表

参数变量	数值	参数变量	数值
T_p/s	20	K_r	0.5
$K_p/(\text{Hz/p.u.MW})$	120	T_r/s	10
T_T/s	0.3	$R/(\text{Hz/p.u.MW})$	2.4
T_G/s	0.08	$K_B/(\text{p.u.MW/Hz})$	0.425
N_g	97	T_R/s	0.513
$\eta/\%$	94.4	T_W/s	1
T_1/s	48.7	$R/(\text{Hz/p.u.MW})$	2.4
T_2/s	10	$K_B/(\text{p.u.MW/Hz})$	0.425
$v/(\text{m/s})$	0~20	$J_r/(\text{kg/m}^2)$	1.2×10^7
$\beta/(\text{°})$	0~90	$J_g/(\text{kg/m}^2)$	34.1
$B_\theta/(\text{N}\cdot\text{m/rad})$	6.215×10^6	$S_{w,n}/\text{MW}$	500

仿真1 将风电发电单元采用传统的风电并网方式与风电作为可调度能源的风电并网方式做对比,对系统采用连续PI控制的策略.

由图5和图6可以看出,将风电单元作为可调度能源并入电网中,可以保证系统的稳定性.

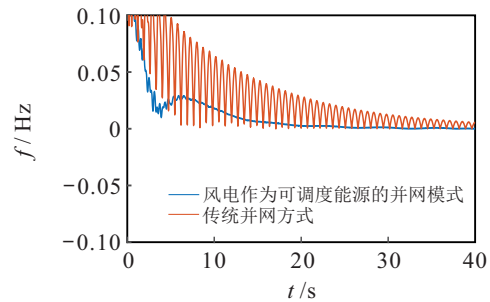


图5 不同风电并网模式下系统频率均差曲线

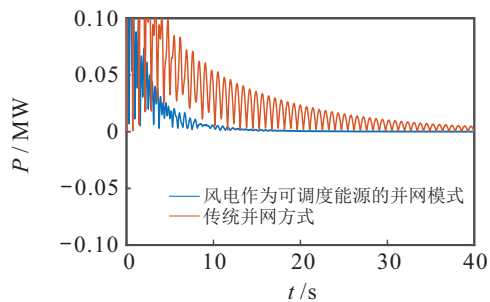


图6 不同风电并网模式下系统功率均差曲线

仿真2 将风电作为可调度能源,对AGC采用周期间歇控制(PIC)、T-APIC和E-APIC.控制策略的参数为:控制周期 $T = 2.5, \sigma_{\max} = 1.002, \Delta = 5$. 图7和

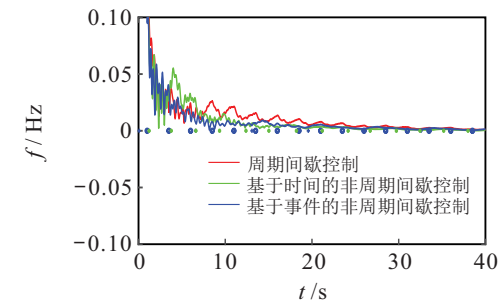


图7 PIC, T-APIC, E-APIC下系统频率均差曲线

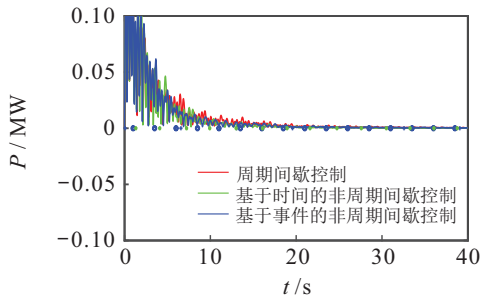


图8 PIC, T-APIC, E-APIC下系统功率均差曲线

图8中o代表PIC的开始时刻,*代表T-APIC的开始时刻,+代表E-APIC的开始时刻。

本文给出了控制次数(NoC)和控制率(RoC),控制率为

$$R_u(t) = \frac{\sum_{s=1}^{N(t)} \tau_s}{t - t_0} \times 100\% \quad (47)$$

从表3中可以清楚地看出,在相同的时间内,E-APIC的控制次数最少.将T-APIC与E-APIC做对比,从图7和图8可以看出,E-APIC下的系统稳定性要略优于T-APIC,从控制次数和控制率的角度分析E-APIC是T-APIC的一半,并且E-APIC降低了系统对时间的依赖性,足以可见含风电能源的AGC系统采用E-APIC不仅使系统的稳定性得到了保证,并且极大地节约了控制成本。

表3 3种算法的NoC和RoC对比

	PIC	T-APIC	E-APIC
NoC	16	14	7
RoC	60%	52.5%	26.25%

仿真3 文献[20]中针对含风电能源的AGC系统采用PID控制策略,文献[21]针对含风电能源的AGC系统采用滑膜控制策略,为比较出本文控制策略的优缺点,故将风电作为可调度能源,使用滑膜面为 $s(t) = Qx(t)$ 的滑膜控制对本文系统施加控制,并对系统施加PID控制,控制参数为: $K_1 = [-0.2, 0.3, 0.3]$, $K_2 = [-0.2, 0.6, 0.2]$, $K_3 = [-0.3, 0.2, 0.3; -0.2, 0.4, 0.4]$. 对比系统基于连续PI控制、连续PID控制、E-APIC和滑膜控制下的系统状态. 由图9和图10可以明显发现,基于E-APIC的系统的状态稳定性要优于PID控制和滑膜控制。

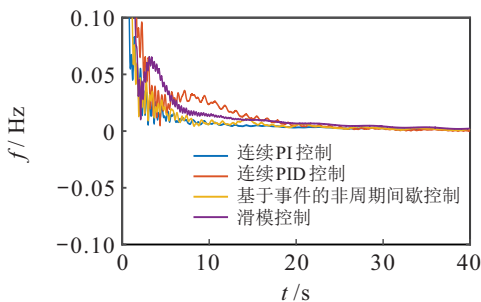


图9 不同控制策略下系统频率均差曲线

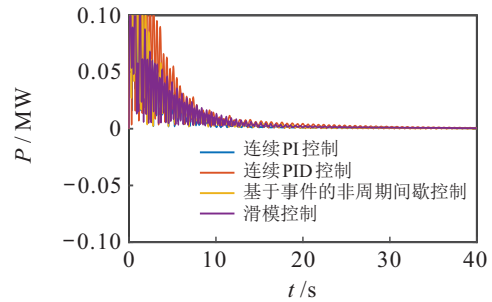


图10 不同控制策略下系统功率均差曲线

仿真4 以IEEE39节点系统为例进行分析,验证所提出的基于E-APIC的含风电能源的AGC控制策略的可行性. IEEE39节点系统如图11所示,火电机组6台,见系统图11中节点31~35和节点39;水电机组4台,见系统图11中节点编号为节点36~38和节点30. 将两个风电机分别安排在节点11和节点16. 在Matlab软件中基于IEEE39节点系统对基于E-APIC的含风电能源的AGC系统进行仿真。

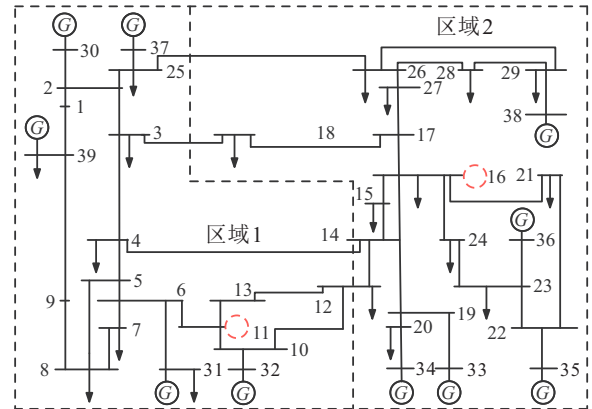


图11 IEEE39总线测试系统单线图

由图12和图13可以看出,含风电能源的AGC采用E-APIC策略可以稳定系统的频率。

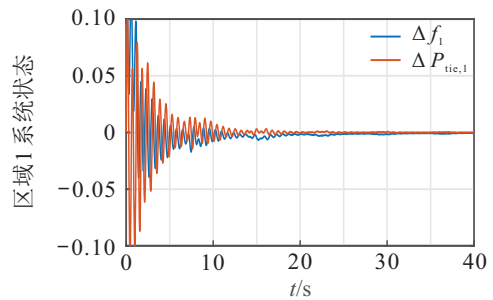


图12 区域1系统状态曲线

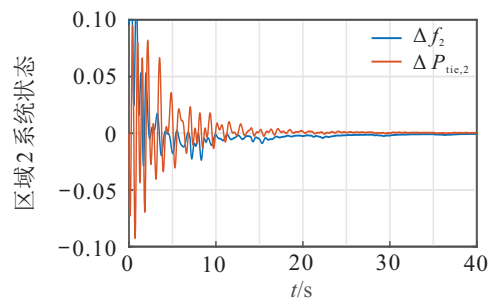


图13 区域2系统状态曲线

5 结 论

本文针对风电并网下的电力系统的负荷频率控制问题,提出了基于APIC的AGC策略,并且将风电单元作为可调度能源并入AGC系统中.仿真案例结果表明:1)传统的风电并网模式已经不足以维持电力系统的频率稳定,将风电作为可调度能源改善了电力系统的频率稳定性能.2)将AGC系统采用APIC,能够在保证电力系统的频率稳定的同时,还能节约控制资源.本文考虑了系统建模中的不确定性,下一步将考虑含风电能源AGC系统管理与控制中的更一般的模型,如含非线性与信号延迟等情况下的系统模型.

参考文献(References)

- [1] Blaabjerg F, Yang Y H, Yang D S, et al. Distributed power-generation systems and protection[J]. *Proceedings of the IEEE*, 2017, 105(7): 1311-1331.
- [2] Kundur P. Power system stability[C]. *Power System Stability and Control*. Boca Raton: CRC Press, 2007: 700-701.
- [3] Wu Q H, Bose A, Singh C, et al. Control and stability of large-scale power system with highly distributed renewable energy generation: Viewpoints from six aspects[J]. *CSEE Journal of Power and Energy Systems*, 2023: 2023, 9(1): 8-14.
- [4] Sperstad I B, Korpås M. Energy storage scheduling in distribution systems considering wind and photovoltaic generation uncertainties[J]. *Energies*, 2019, 12(7): 1231.
- [5] 赵熙临, 陈绪荣, 张乘承, 等. 含风电的交直流互联电网自适应SPMC调频策略[J]. *现代电力*, 2022, 39(4): 414-421.
(Zhao X L, Chen X R, Zhang C C, et al. Adaptive SPMC frequency modulation strategy for AC/DC interconnected grid including wind power[J]. *Modern Electric Power*, 2022, 39(4): 414-421.)
- [6] 姚琦, 胡阳, 柳玉, 等. 考虑载荷抑制的风电场分布式自动发电控制[J]. *电工技术学报*, 2022, 37(3): 697-706.
(Yao Q, Hu Y, Liu Y, et al. Distributed automatic generation control of wind farm considering load suppression[J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2022, 37(3): 697-706.)
- [7] Xi L, Li H K, Zhu J Z, et al. A novel automatic generation control method based on the large-scale electric vehicles and wind power integration into the grid[J]. *IEEE Transactions on Neural Networks and Learning Systems*, 2024, 35(5): 5824-5834.
- [8] Liu B, Yang M, Xu B, et al. Exponential stabilization of continuous-time dynamical systems via time and event triggered aperiodic intermittent control[J]. *Applied Mathematics and Computation*, 2021, 398: 125713.
- [9] 吴新杰, 陈世明. 基于事件触发的非线性多智能体系统的固定时间分群一致性[J]. *控制与决策*, 2023, 38(5): 1278-1285.
(Wu X J, Chen S M. Fixed-time group consensus control for nonlinear multi-agent systems based on event-triggered mechanism[J]. *Control and Decision*, 2023, 38(5): 1278-1285.)
- [10] 徐勇, 朱万里, 李杰. 基于事件触发和状态翻转的布尔控制网络输出跟踪[J]. *控制与决策*, 2023, 38(5): 1258-1266.
(Xu Y, Zhu W L, Li J. Output tracking of Boolean control networks based on event-triggered and state-flipped[J]. *Control and Decision*, 2023, 38(5): 1258-1266.)
- [11] 高宏宇, 张曼容, 姜博, 等. 基于动态事件触发的状态饱和和复杂网络递推滤波[J]. *控制与决策*, 2022, 37(2): 401-408.
(Gao H Y, Zhang M R, Jiang B, et al. Recursive filtering for state saturated complex networks under dynamic event-triggered mechanism[J]. *Control and Decision*, 2022, 37(2): 401-408.)
- [12] 杨菲阳, 于志永, 蒋海军, 等. 事件触发间歇通讯下多智能体系统的固定时间分布式优化[J]. *控制与决策*, 2023, 38(5): 1412-1419.
(Yang F Y, Yu Z Y, Jiang H J, et al. Distributed fixed-time optimization for multi-agent systems via event-triggered intermittent communication[J]. *Control and Decision*, 2023, 38(5): 1412-1419.)
- [13] 杨蒙. 基于事件触发的间歇控制设计及其在微电网频率控制中的应用[D]. 株洲: 湖南工业大学, 2020: 44-60.
(Yang M. Design of intermittent control based on event triggering and its application in frequency control of microgrid[D]. Zhuzhou: Hunan University of Technology, 2020: 44-60.)
- [14] Yan C H, Liu B, Xiao P, et al. Stabilization of load frequency control system via event-triggered intermittent control[J]. *IEEE Transactions on Circuits and Systems II: Express Briefs*, 2022, 69(12): 4934-4938.
- [15] 邓红珍. 基于风电主动参与调频的自动发电控制策略研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2022: 15-28.
(Deng H Z. Automatic generation control strategy with active participation of wind power in frequency regulation[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2022: 15-28.)
- [16] 杨岸青. 一类切换系统的鲁棒控制问题[D]. 济南: 齐鲁工业大学, 2019: 10-24.
(Yang A Q. Robust control of a class of switched systems[D]. Jinan: Qilu University of Technology, 2019:

- 10-24.)
- [17] Liu X J, Zhang Y, Lee K Y. Coordinated distributed MPC for load frequency control of power system with wind farms[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2017, 64(6): 5140-5150.
- [18] Nejad A R, Guo Y, Gao Z, et al. Development of a 5 MW reference gearbox for offshore wind turbines[J]. Wind Energy, 2016, 19(6): 1089-1106.
- [19] Liu B, Yang M, Liu T, et al. Stabilization to exponential input-to-state stability via aperiodic intermittent control[J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 2021, 66(6): 2913-2919.
- [20] 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 X L, Lin Z Y, Fu B, 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.)
- [21] 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[J]. 控制与决策, 2019, 34(2): 437-444.
(Mi Y, Hao X Z, Liu H Y, et al. Multi-area power system with wind power and energy storage system load frequency control based on sliding model control[J]. Control and Decision, 2019, 34(2): 437-444.)

作者简介

杨兴旺(1999—), 男, 硕士生, 主要研究方向为基于间歇控制的自动发电控制策略, E-mail: M22085800015@stu.hut.edu.cn;

刘斌(1966—), 男, 教授, 博士, 主要研究方向为混合动力系统的稳定性、网络化系统控制, E-mail: liubin@hut.edu.cn;

刘勇(2001—), 男, 硕士生, 主要研究方向为间歇控制, E-mail: M22085800004@stu.hut.edu.cn;

傅志忠(2000—), 男, 硕士生, 主要研究方向为离散时滞系统间歇控制, E-mail: M22081101007@stu.hut.edu.cn.