

电力市场下含风电电力系统数据驱动负荷频率弹性控制

曾一明¹, 卜旭辉¹, 尹艳玲²

(1. 河南理工大学 电气工程与自动化学院 河南省煤矿装备智能检测与控制重点实验室, 河南 焦作 454003;
2. 河南理工大学 工商学院 能源经济研究中心, 河南 焦作 454003)

摘要: 随着电力市场各区域间功率交换愈加频繁, 电力系统稳定性也受到影响。为了解决电力市场下各区域间功率交易以及拒绝服务攻击对风能电力系统的干扰, 在考虑到多区域风能电力系统模型难以建立的前提下, 文章设计了基于数据驱动的负荷频率控制方法。该方法首先通过采集输入、输出数据, 利用紧格式动态线性化技术对伪偏导数进行参数估计, 设计出一种改进的无模型自适应控制算法; 然后, 引入抗饱和和补偿控制算法解决控制系统因输入饱和而造成的输出不跟随问题, 并理论性证明了控制算法的稳定性; 最后, 以三区域风电系统为例, 通过 Matlab 仿真验证文章所提算法的有效性。

关键词: 电力市场; 风能电力系统; 负荷频率控制; 无模型自适应控制

中图分类号: TK51 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-5292(2025)05-0673-08

0 引言

作为电力系统的二次调频, 负荷频率控制 (Load Frequency Control, LFC) 对电力系统的稳定性意义重大^[1,2]。因此, 近年来众多学者针对 LFC 问题提出了大量的控制方法, 如滑模控制^[3,4]、鲁棒控制^[5]以及模型预测控制^[6,7]等。这些经典的控制方法对解决 LFC 稳定性问题^[8,9]提供了思路, 为电力频率控制做出了巨大贡献。

目前, 电力系统大多为多区域联合的大型控制系统, 每个电力系统包含多个控制区域, 区域之间彼此通信。随着电力系统逐步进入市场化, 区域之间功率可以自由地通过联络线进行交易。尤其在自由竞争的市场环境下, 各个区域都是一个独立的控制过程, 且每个控制区域均包含发电公司、输电公司、配电公司 3 个市场主体, 各区域的发电公司可以与其他区域的配电公司进行交易。并且随着电力系统区域间合同交流的频繁, 电力系统极易遭受拒绝服务 (Denial of Service, DoS) 攻击, 造成控制数据传输失败, 从而使得 LFC 稳定控制越发困难。针对电力系统各区域之间功率交换的影响, 文献[10]通过引入配电分配矩阵建立 LFC 模型, 采用分布式模型预测控制的方法进行控制。

文献[11]提出了状态反馈 LFC 控制方法, 基于采样控制理论建立采样 LFC 模型, 并利用李雅普诺夫第一法进行稳定性分析。对于解决 DoS 攻击的方法有多种, 文献[12]提出了一种基于事件触发的 H_∞ 模型预测负荷频率控制方法, 解决了 DoS 攻击对新能源电力系统带来的扰动, 并减少了网络带宽负荷。文献[13]针对 DoS 攻击设计了一种弹性预测负荷频率控制方案, 利用李雅普诺夫理论分析了 LFC 方法的稳定性。以上控制方法均是基于模型的控制理论, 随着电力系统的复杂化以及新能源的并入, 多区域电力系统的模型难以建立。基于模型的控制方法十分困难, 摆脱系统对于模型的依赖, 设计以数据驱动^[14,15]的控制方法更加适合如今高度复杂的电力系统。

随着数据驱动控制理论的发展, 数据驱动在电力系统的应用愈加广泛。主要通过采集系统的输入、输出 (I/O) 数据, 构造电力系统的数学关系, 设计相应的数据驱动控制方法, 从而实现 LFC 的稳定控制。文献[16]提出了一种基于深度强化学习的多区域电力系统 LFC 数据驱动控制方法, 设计出非线性自适应 LFC 控制器。然而电力系统的关系需经大量的数据进行训练得到, 深度学

收稿日期: 2024-01-15。

基金项目: 国家自然科学基金 (62273133); 中原科技创新领军人才项目 (254000510001);
河南省自然科学基金杰出青年基金 (242300421053)。

通信作者: 卜旭辉 (1981-), 教授, 博士生导师, 研究方向为数据驱动控制、学习系统、电力系统运行控制。E-mail: bxhtong@126.com

习控制不能对电力 I/O 数据实现无偏差的估计。文献[17]设计了以模糊控制理论为基础的 LFC 控制方法, 这种控制算法虽然可以降低控制器对模型的依赖, 但是其模糊规则要设计者制定, 过度依赖设计者的经验。文献[18]提出了一种基于无模型自适应控制的负荷频率控制方法, 可以仅利用系统 I/O 数据进行控制器的设计。然而以上控制策略均未考虑 DoS 攻击下的新能源电力系统市场功率交换问题。

本文针对模型未知的非线性多区域风能电力系统, 通过引入发电参与矩阵 (Generation Participation Matrix, GPM) 来模拟电力市场区域间的合同交易。采用数据驱动的控制方法研究电力市场影响下的风电系统频率稳定控制问题, 基于紧格式动态线性化 (Compact Form Dynamic Linearization, CFDL) 设计了改进的无模型自适应约束控制算法。本文给出了算法设计的详细过程,

并对系统的稳定性进行了理论分析, 仿真结果进一步验证了算法的有效性。

1 电力市场下的风能电力系统

本文研究电力市场下风能电力系统的 LFC, GPM 为发电参与矩阵。其行向量对应控制区域的合同功率, 列向量则对应发电公司。例如, 对于具有 m 个控制区域和 n 个发电公司的大型电力系统, GPM 表达式为

$$GPM = \begin{bmatrix} gpf_{11} & gpf_{12} & \cdots & gpf_{1m} \\ gpf_{21} & gpf_{22} & \cdots & gpf_{2m} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ gpf_{n1} & gpf_{n2} & \cdots & gpf_{nm} \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中: gpf_{qi} 为在控制区域 i 发电公司 q 的参与因子; 该矩阵中每一列中所有项的和为一个单位, 即

$$\sum_{q=1}^n gpf_{qi} = 1。$$

双边合同下的控制区 i 的 LFC 结构如图 1 所示。

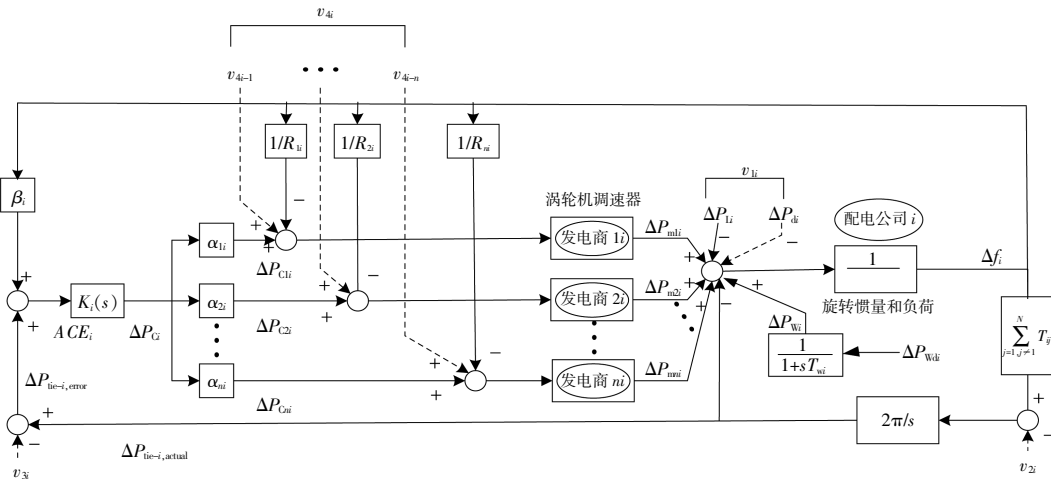


图 1 风能电力系统 LFC 结构图
Fig.1 LFC structure of wind power system

图 1 中: v_{li} 为区域 i 的合同需求以及负荷扰动的总和; v_{2i} 为各个控制区域和其他区域之间的界面效果, 即其他区域与区域 i 之间的接口量; v_{3i} 为联络线的计划联络功率; v_{4i} 为各区域的配电公司与其它区域的发电公司之间可能存在的合同。不同的配电公司与其它配电公司以及发电公司之间可能存在不同的合同, 这部分信息在图中以虚线的形式表示。

由图 1 可得:

$$\Delta \dot{f}_i(t) = -\frac{D_i}{M_i} \Delta f_i(t) - \frac{1}{M_i} \Delta P_{tie-i, actual}(t) +$$

$$\frac{1}{M_i} \sum_{h=1}^n \Delta P_{whi}(t) - \frac{1}{M_i} v_{li}(t) + \frac{1}{M_i} \Delta P_{wi}(t) \quad (2)$$

$$\Delta \dot{P}_{tie, error}(t) = 2\pi \left[\sum_{j=1, j \neq i}^N T_{ij} \Delta f_j(t) - v_{2i}(t) \right] - v_{3i}(t) \quad (3)$$

$$\Delta \dot{P}_{nwi}(t) = -\frac{1}{T_{nwi}} \Delta P_{nwi}(t) + \frac{1}{T_{nwi}} \Delta P_{gni}(t) \quad (4)$$

$$\Delta \dot{P}_{gni}(t) = -\frac{1}{T_{gni} R_{ni}} \Delta f_i(t) - \frac{1}{T_{gni}} \Delta P_{gni}(t) +$$

$$\frac{1}{T_{gni}} \Delta P_{Cui}(t) + \frac{1}{T_{gni}} v_{4i-n}(t) \quad (5)$$

$$\Delta \dot{P}_{wi}(t) = -\frac{1}{T_w} \Delta P_{wi}(t) + \frac{1}{T_w} \Delta P_{wli}(t) \quad (6)$$

式中: Δf_i 为控制频率偏差; $\Delta P_{\text{tie-}i, \text{error}}$ 为联络线功率偏差; $\Delta P_{\text{tie-}i, \text{actual}}$ 为实际的联络线功率变化量; ΔP_{m_i} 为发电机机械功率变化量; ΔP_{C_i} 为系统的控制输入; ΔP_{L_i} 为负荷需求量; ΔP_{d_i} 为负荷扰动量; ΔP_{wd_i} 为风电需求量; ΔT_{wd_i} 为风电时间常数; D_i 为等效阻尼系数; M_i 为惯性系数; R_i 为下垂系数; T_{ij} 为区域间联络时间常数; T_{i_i} 为原动机时间常数; T_{g_i} 为调速器时间常数; ΔP_{w_i} 为风电功率。

在电力系统中, 流过联络线的功率和计划功率之间会存在一定的功率偏差, 该偏差将用于构成区域控制偏差信号 (Area Control Error, ACE), 其表达式为

$$\text{ACE}_i(k) = \beta_i \Delta f_i(k) + \Delta P_{\text{tie-}i, \text{error}}(k) \quad (7)$$

式中: $\beta_i = \frac{1}{R_i} + D_i$ 为偏差系数; $\Delta P_{\text{tie-}i, \text{error}}(k)$ 为联络线功率偏差。

区域 i 的电力系统的状态空间方程为

$$\begin{cases} \dot{x}_i(t) = A_i x_i(t) + B_i u_i(t) + F_i v_i(t) \\ \text{ACE}_i(t) = C_i x_i(t) \end{cases} \quad (8)$$

式中: 具体参数见文献[19]。

2 算法设计与稳定性分析

考虑风能电力系统的实际情况, 为了便于分析, 将状态空间式(4)离散化可得:

$$\text{ACE}_i(k+1) = C_i L_i x_i(k) + C_i I_i u_i(k) + C_i G_i v_i(k) \quad (9)$$

式中: $L_i = e^{A_i T}$, $I_i = \int_0^T e^{A_i t} B_i dt$, $G_i = \int_0^T e^{A_i t} F_i dt$ 均为未知矩阵; T 为采样周期; k 为采样时刻。

将风电系统视为未知的非线性系统, 并将非线性离散方程(5)抽象化为 $\text{ACE}_i(k+1) = f[\text{ACE}_i(k), u_i(k) + d_i(k)]$, 其中 $d_i(k)$ 为系统的负荷需求以及合同变化量。在设计算法之前首先给出风能电力系统满足的两个假设: ① $f(\cdot)$ 关于系统控制输入 $u_i(k)$ 和 $d_i(k)$ 的偏导数连续; ② 对于任意时刻 k , $k \geq 0, i=1, 2, 3, \dots$, 系统满足广义 Lipschitz 条件, 即当 $|\Delta u_i(k)| \neq 0$ 以及 $|\Delta d_i(k)| \neq 0$ 时, $|\text{ACE}_i(k+1)| \leq C_1 |\Delta u_i(k)|$, $|\Delta \text{ACE}_i(k+1)| \leq C_2 |\Delta d_i(k)|$, C_1, C_2 均为大于 0 的常数。

根据假设①, ②, 系统可以写成:

$$\begin{aligned} \Delta \text{ACE}_i(k+1) &= \frac{\partial f^*}{2 \partial u_i(k)} \Delta u_i(k) + \\ &\quad \frac{\partial f^*}{2 \partial d_i(k)} \Delta d_i(k) + \delta_i(k) \end{aligned} \quad (10)$$

式中: $\frac{\partial f^*}{2 \partial u_i(k)}$ 为 $f(\cdot)$ 在 $u_i(k)$ 的偏导数; $\frac{\partial f^*}{2 \partial d_i(k)}$ 为 $f(\cdot)$ 在 $d_i(k)$ 的偏导数; $\delta_i(k) = f[\text{ACE}_i(k), u_i(k) + d_i(k-1)] - f[\text{ACE}_i(k-1), u_i(k-1) + d_i(k-1)]$ 。

因为 $|\Delta u_i(k)| \neq 0$, 对于任意时刻 k , 考虑等式 $\delta_i(k) = \chi_i(k) \Delta u_i(k)$, 式(6)简化为

$$\Delta \text{ACE}_i(k+1) = \phi_i(k) \Delta u_i(k) + \varphi_i(k) \Delta d_i(k) \quad (11)$$

式中: $\phi_i(k) = \frac{\partial f^*}{2 \partial u_i(k)} + \chi_i(k)$; $\varphi_i(k) = \frac{\partial f^*}{2 \partial d_i(k)}$ 。

2.1 DoS 攻击

电力系统一般是多区域互联的大型控制系统, 系统区域之间或区域内在传输信息和数据时, 很容易遭受到网络攻击, 造成数据传输错误或者数据传输失败。针对电力系统在受到 DoS 网络攻击展开分析, 当系统处于 DoS 攻击期时, 由传感器测量的实时输出信号 $\text{ACE}_i(k)$ 将无法传输。非周期性 DoS 攻击如图 2 所示。

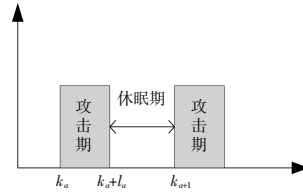


图 2 拒绝服务攻击示意图

Fig.2 Schematic diagram of denial-of-service attack

2.2 PPD 算法和收敛性分析

根据无模型自适应控制理论, 可得本算法中控制输出观测器为

$$\hat{\text{ACE}}_i(k+1) = \hat{\text{ACE}}_i(k) + \Phi_i^T(k) \hat{\theta}_i(k) + K_i e_o(k) \quad (12)$$

式中: $e_o(k) = \hat{\text{ACE}}_i(k) - \text{ACE}_i(k)$ 为输出估计误差; $\hat{\text{ACE}}_i(k)$ 为 t 时刻的估计输出值; $\hat{\theta}_i(k) = [\hat{\theta}_i(k), \hat{\varphi}_i(k)]^T$ 。

增益 K_i 的取值在单位圆内且 $F_i = 1 - K_i$, 从而可以得到 $\hat{\theta}_i(k)$ 的更新算法为

$$\hat{\theta}_i(k+1) = \hat{\theta}_i(k) + \Phi_i(k) \Gamma_i(k) [e_o(k+1) + F_i e_o(k)] \quad (13)$$

式中: 增益函数 $\Gamma_i(k) = 2 / (\mu_i + |\Phi_i(k)|^2)$; μ_i 为一个正数。

对任意时刻 k , $\Gamma_i(k)$ 恒为正数, 假设 $|\Phi_i(k)| \leq \gamma_i$, 则 $|\Gamma_i(k)| \geq 2 / (\gamma_i^2 + \mu_i) = \tau_i > 0$ 。

$$\begin{cases} e_o(k+1) = \Phi_i^T(k) \tilde{\theta}_i(k) - F_i e_o(k) \\ \tilde{\theta}_i(k+1) = \eta_i \tilde{\theta}_i(k) \end{cases} \quad (14)$$

式中: $\eta_i = I_2 - \Phi_i(k) \Gamma_i(k) \Phi_i(k)^T$ 。

由于 $[e_o(k), \Theta_i(k)]$ 是全局渐进稳定的, 系统估计输出误差是收敛的, 且估计误差 $e_o(k)$ 收敛到 0。因此, 对于任意时刻 $e_o(k)$ 和 $\tilde{\theta}_i(k)$ 都是有界的, 且 $\lim_{k \rightarrow \infty} e_o(k) = 0$ 。为了使参数估计算法具有更强的跟踪时变参数的能力, 本文提出了一种重置算法。即:

$$\text{if } |\hat{\phi}_i(k)| \leq \varepsilon \text{ or } \tilde{\theta}_i^T(k) \tilde{\theta}_i(k) \leq \varepsilon, \tilde{\theta}_i(k) = \tilde{\theta}_i(1) \quad (15)$$

式中: ε 为一个小的正数, 本文取 $\varepsilon = 10^{-5}$; $\tilde{\theta}_i(1)$ 为 $\tilde{\theta}_i(k)$ 的初始值。

2.3 控制算法设计与稳定性分析

定义控制输入准则函数为 $J[u_i(k)] = |ACE_d - ACE_i(k+1)|^2 + \alpha_i |\Delta u_i(k)|^2$ 。其中, ACE_d 为系统的期望输出, α_i 为一个正数。结合式(10)将输入准则函数关于 $u_i(k)$ 求偏导并令其等于 0, 可以得到基于观测器的输入控制算法。

$$u_i^0(k) = u_i(k-1) + \frac{\hat{\phi}_i(k) [ACE_d - \hat{ACE}(k) - Ke_o(k) - \hat{\varphi}_i(k) \Delta d_i(k)]}{|\hat{\phi}_i(k)|^2 + \alpha_i} \quad (16)$$

对于实际的控制系统, 控制输入是有界的, 因此在设计控制器时, 要对控制输入设计以下合理的约束条件。

$$u_i(k) = \text{sat}[u_i(k)] = \begin{cases} -U_{i0} & u_i(k) < -U_{i0} \\ u_i(k) & -U_{i0} \leq u_i(k) \leq U_{i0} \\ U_{i0} & u_i(k) > U_{i0} \end{cases}$$

其中 $U_{i0} \in \mathbf{R}$, U_{i0} 代表系统的输入饱和值。当控制器所得的信号在约束条件外时, 系统便无法保证输出的跟踪性能, 因此, 设计如下的抗饱和补偿器:

$$\zeta_i(k+1) = \sigma_i \zeta_i(k) + \hat{\phi}_i(k) [u_i^0(k) - u_i(k)] \quad (17)$$

其中 σ_i 为一个小于 1 的正数, 因此, 控制算法变为

$$u_i^0(k) = u_i(k-1) + \hat{\phi}_i(k) / (|\hat{\phi}_i(k)|^2 + \alpha_i) \times [ACE_d - \hat{ACE}(k) - \sigma_i \zeta_i(k) - Ke_o(k) - \hat{\varphi}_i(k) \Delta d_i(k)] \quad (18)$$

当无线信道受到 DoS 攻击时, 电力系统的数据传输将会失败, 因此 LFC 控制器由于无法获得

实时采样数据而无法更新。当控制器无法接收到实时采样数据时, 选择零阶保持器来维持系统的控制输入。结合以上分析, 本文的控制算法设计为

$$\hat{\theta}_i(k) = \begin{cases} \hat{\theta}_i(k-1) + \Phi_i(k-1) \Gamma_i(k-1) [e_o(k) + Fe_o(k-1)] & k \in \gamma_i(0, k) \\ \hat{\theta}_i(k-1) & k \in \Omega_i(0, k) \end{cases}$$

$$\text{if } |\hat{\phi}_i(k)| \leq \varepsilon \text{ or } \tilde{\theta}_i^T(k) \tilde{\theta}_i(k) \leq \varepsilon, \hat{\theta}_i(k) = \hat{\theta}_i(1) \quad (19)$$

$$u_i^0(k) = \begin{cases} u_i(k-1) + \frac{\hat{\phi}_i(k)}{|\hat{\phi}_i(k)|^2 + \alpha_i} \cdot [ACE_d - \hat{ACE}(k) - \sigma_i \zeta_i(k) - Ke_o(k) - \hat{\varphi}_i(k) \Delta d_i(k)] & k \in \gamma_i(0, k) \\ u_i^0(k-1) & k \in \Omega_i(0, k) \end{cases}$$

为了清楚地描述本文针对电力系统 LFC 设计的控制方案, 本文控制如图 3 所示。

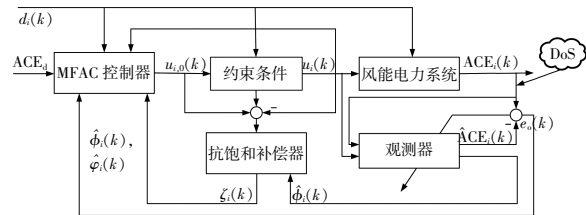


图 3 电力系统 LFC 控制图

Fig.3 Power system LFC control block diagram

当 DoS 处于攻击期, $u_i^0(k) = u_i(k-1)$, 系统的控制信息传输失败, 将上一时刻的控制输入作为攻击时的控制输入。因此, 只须证得攻击处于休眠期时系统跟踪误差收敛即可。

根据李雅普诺夫函数 $V_{i,2}(k) = |e_i(k)|$ 可以得到 $\Delta V_{i,2}(k+1) = |e_i(k+1)| - |e_i(k)| = (1-a_1)V_{i,2}(k) + a_2$ 。因为 $0 \leq a_1 < 1$ 且 a_2 是有界的, 对于所有的时刻 $k, \lim_{k \rightarrow \infty} |e_i(k)| \leq \frac{a_2}{1-a_1}$ 。基于系统控制输入的约束条件和控制算法, 定义系统的跟踪误差。 $\bar{e}_i(k) = ACE_d - ACE_i(k)$, 因为 $\bar{e}_i(k) = e_i(k) - e_o(k)$, 由以上分析得到 $\lim_{k \rightarrow \infty} |e_o(k)| = 0$, 所以对于所有时刻 $k, \bar{e}_i(k)$ 有界且 $\lim_{k \rightarrow \infty} |\bar{e}_i(k)| \leq \frac{a_2}{1-a_1}$, 系统的跟踪误差收敛。

3 仿真分析

本文采用三区域电力系统作为仿真模型, 图

4 为三区域电力系统图,区域 1 与区域 2、区域 3 之间通过联络线分别连接,区域 2 与区域 3 不连接,每个控制区域有 1 个配电公司和 3 个发电公司。图中,G3,G6 和 G9 为风电机,其他为火力发电机。

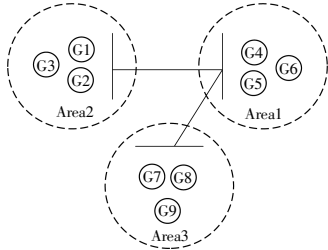


图 4 三区域电力系统

Fig.4 Power system of three control areas

本文中所有仿真联络线时间常数选择为 $T_{12}=0.245$; $T_{13}=0.212$; $T_{23}=0$, $T_{w1}=T_{w2}=T_{w3}=0.15$ s。采样周期 $T=0.001$ s,其他具体参数如表 2 所示。

表 2 发电公司运行数据

Table 2 Operation data of power generation company

参数	G1	G2	G3	G4	G5	G6
ΔP_{wi}	800	1 000	1 100	1 200	1 000	1 000
$R/p.u.$	2.40	3.30	2.50	2.40	3.00	3.40
T_i/s	0.32	0.30	0.32	0.30	0.31	0.34
T_e/s	0.06	0.08	0.06	0.07	0.08	0.06
α	0.50	0.50	0.50	0.50	0.60	0.40

3.1 区域间功率交易实验

为验证 LFC 稳定性,本文的总仿真时长设置为 60 s,采样周期 $T=0.001$ s,此仿真首先各区域之间存在负荷需求,且风电机参与产生发电功率。其中各区域的负荷需求为 $\Delta P_{L1}=0.06$ p.u., $\Delta P_{L2}=0.08$ p.u., $\Delta P_{L3}=0.06$ p.u.,各区域风电机的负荷量为 $\Delta P_{w1}=0.01$ p.u., $\Delta P_{w2}=-0.02$ p.u., $\Delta P_{w3}=0.01$ p.u.,则发电参与矩阵 GPM 为

$$GPM = \begin{bmatrix} 0.25 & 0.25 & 0 \\ 0.50 & 0 & 0 \\ 0 & 0.25 & 0.50 \\ 0.25 & 0.25 & 0 \\ 0 & 0.25 & 0.25 \\ 0 & 0 & 0.25 \end{bmatrix} \quad (20)$$

图 5 为三区域频率变化情况。由图 5 可以看出,系统存在负荷扰动时,三区域频率均可在 5 s 内收敛到 0,验证了本文设计的控制算法可以实现三区域风电系统的稳定控制。

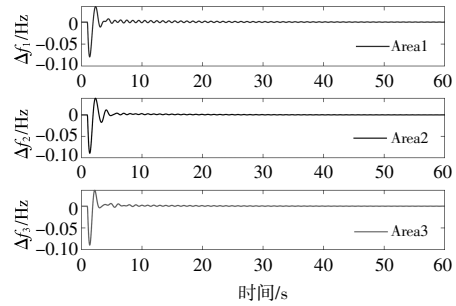


图 5 三区域频率变化

Fig.5 Frequency variation in three areas

图 6 为区域间联络线功率变化。当三区域电力系统区域间存在合同交易时,区域间可以通过联络线实现功率交换。

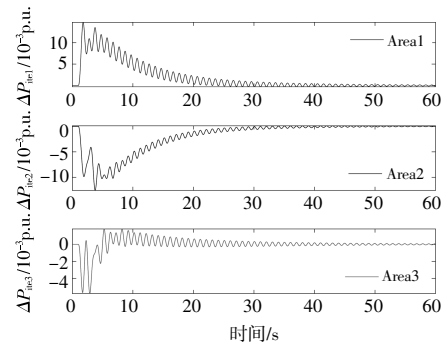


图 6 三区域联络线功率变化

Fig.6 Power variation of the tie line in three areas

由图 6 可以看出,前期功率交换较为明显,随着合同的完成联络线功率逐渐收敛。

图 7 为系统机械功率变化。

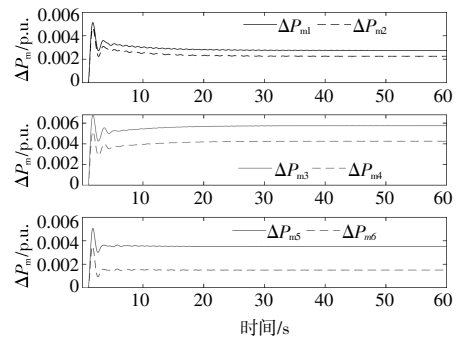


图 7 三区域机械功率变化

Fig.7 Variation of mechanical power in three areas

3.2 变负荷试验

为了验证本算法的一般性,本文进行变负荷仿真试验,总仿真时长为 200 s,采样周期不变。图 8 为三区域负荷变化情况。

由图 8 可以看出,三区域负荷变化明显。电力系统在稳定运行时,允许系统频率存在 ± 0.2 Hz 的

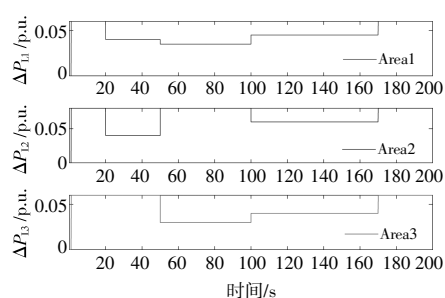


图 8 三区域负荷变化

Fig.8 Variation of load in three areas

波动。而且电力系统在频率调节时有一次、二次、三次调节以及紧急控制，负荷频率控制是电力系统的二次调节，其调节时间为分钟级。

图 9 为三区域频率变化情况。

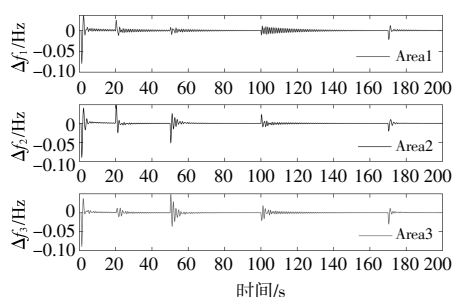


图 9 变负荷下系统频率变化

Fig.9 System frequency variation under variable load

由图 9 可以看出，三区域电力系统的频率除区域 1 在 100 s 时经历负荷扰动后，20 s 基本实现收敛到 0。其他均可在 8 s 以内收敛到 0，符合系统调频时间范围。且频率波动在 $[-0.085, +0.05]$ Hz，远远小于 ± 0.2 Hz 要求。同样证明了本文设计的控制算法在变负荷情况下依然可以实现频率的快速稳定，从而验证本文所提算法具有一般性。

图 10 为变负荷下三区域联络线功率变化情况。

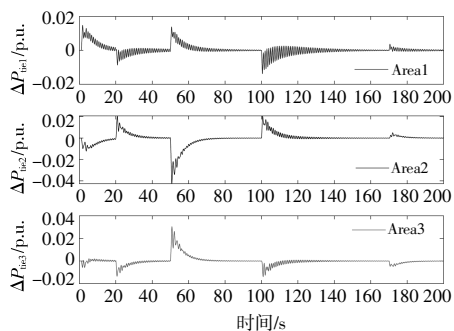


图 10 变负荷下系统联络线功率变化

Fig.10 Variation of system tie line power under variable loads

因为三区域电力系统各区域之间签订了合同，使得区域之间通过联络线按照合同进行功率交换。由图 10 可以看出，随着区域间功率交换的进行，系统联络线功率逐渐收敛。

3.3 DoS 攻击试验

本文为三区域风能电力系统在变负荷下的 DoS 攻击仿真分析，此次仿真时长 150 s。为了使算法更具一般性，负荷变化情况与前文不同，各区域负荷需求变化情况如图 11 所示。

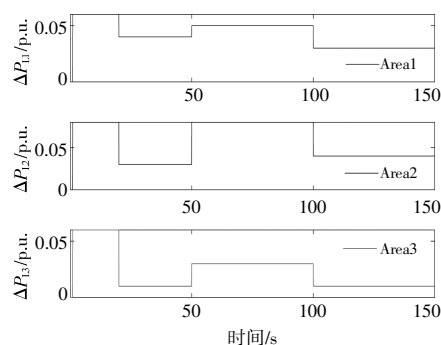


图 11 三区域负荷需求变化

Fig.11 Changes in load demand in three areas

图 12 为 DoS 攻击下三区域频率变化情况。

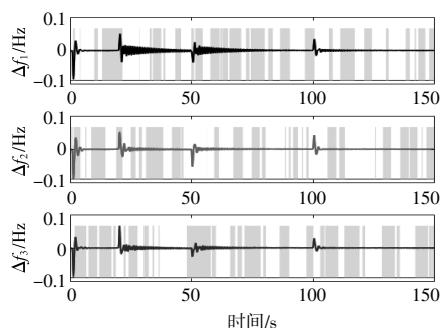


图 12 DoS 攻击下三区域频率变化

Fig.12 Frequency change of three areas under DoS attack

由图 12 可以看出，三区域频率波动均在 $[-0.09, +0.064]$ Hz，符合频率变化在 ± 0.2 Hz 的要求。除区域 1 在 20, 50 s 受负荷扰动影响收敛较慢外，其余均在 10 s 以内收敛到 0，收敛的时间同样符合 LFC 调节的范围，从而验证了本文所设计的控制算法可以有效地保证系统的稳定性。

3.4 风能变化实验

风能不稳定因素较多。本节研究随机风能对电力系统频率控制的影响，图 13 为三区域随机风能变化，以白噪声信号模拟随机风能变化。图 14 为三区域的频率变化情况。

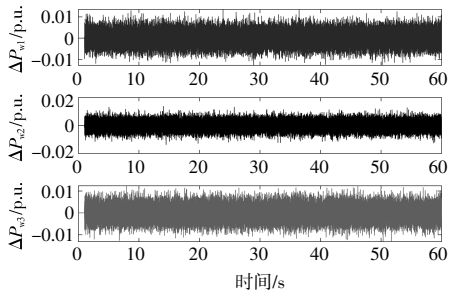


图 13 三区域随机风能变化

Fig.13 Stochastic wind energy variations in three areas

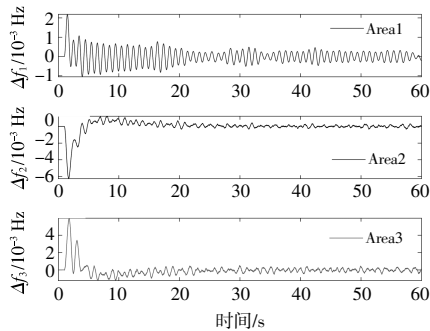


图 14 随机风能影响下三区域频率变化

Fig.14 Frequency changes in the three areas under the stochastic wind energy

由图 14 可以看出,区域 2 的频率波动范围较大一些,但是三区域在 ± 0.0063 Hz 内波动,频率波动范围较小,系统可以经过二次调频调节。

4 结论

本文研究 DoS 攻击以及市场功率交换下的风能电力系统 LFC 稳定性问题,通过引入 GPM 模拟区域间的合同交流,建立含有 GPM 的动态演化关系。仅利用电力系统的 I/O 数据,并基于观测器技术的 PPD 估计算法,设计出基于输入约束的无模型自适应负荷频率控制器。通过构造李雅普诺夫函数,理论性证明了控制算法中 PPD 的稳定性以及系统跟踪误差的收敛性。以三区域风电系统为例进行仿真分析,结果表明,在电力市场环境因素影响下,本文所提算法可以有效解决 DoS 攻击问题,并以随机风能信号作为干扰因素进行实验,进一步验证了算法的一般性和有效性。

参考文献:

[1] Alhelou H H, Hamedani-Golshan M E, Zamani R, et al. Challenges and opportunities of load frequency control in conventional, modern and future smart power systems: a comprehensive review [J]. Energies, 2018, 11

(10): 2497-2531.
 [2] 林毅,林伟伟,张菁娟,等.计及调频效益的微电网源-荷动态频率调整研究 [J]. 可再生能源, 2023, 41(5): 660-666.
 [3] Guo J. Application of a novel adaptive sliding mode control method to the load frequency control [J]. European Journal of Control, 2021, 57: 172-178.
 [4] 米阳,徐怡雯,时帅,等.新型时滞可再生电力系统集成模型的滑模负荷频率控制设计[J].中国电机工程学报, 2022, 42(11): 3953-3963.
 [5] Ming G, Geng J, Liu J, et al. Load frequency robust control considering intermittent characteristics of demand-side resources [J]. Energies, 2022, 15(12): 4370-4389.
 [6] Liu J, Yao Q, Hu Y. Model predictive control for load frequency of hybrid power system with wind power and thermal power [J]. Energy, 2019, 172: 555-565.
 [7] Wang H, Li Z S. Multi-Area load frequency control in power system integrated with wind farms using fuzzy generalized predictive control method [J]. IEEE Transactions on Reliability, 2022, 72(2): 737-747.
 [8] 李红,任永峰.含可再生能源的多微网系统负荷频率控制策略[J].可再生能源, 2023, 41(5): 699-704.
 [9] Tian E, Peng C. Memory-based event-triggering load frequency control for power systems under deception attacks [J]. IEEE Transactions on Cybernetics, 2020, 50(11): 4610-4618.
 [10] 赵良德,梁晓伟,庄磊,等.电力市场下的分布式模型预测负荷频率控制[J].电力科学与技术学报, 2021, 36(4): 109-115.
 [11] Shang Guan X, He Y, Zhang C, et al. Sampled-data based discrete and fast load frequency control for power systems with wind power [J]. Applied Energy, 2020, 259: 1-13.
 [12] Hossain M M, Peng C. Predictive event-triggered load frequency control for hybrid power systems under denial-of-service attacks [J]. IET Generation, Transmission & Distribution, 2020, 14(26): 6457-6467.
 [13] Wang Z, Danilczyk W, Li H, et al. Resilient predictor-based load frequency control for multi-region power systems under DoS attacks [A]. 2022 IEEE Power & Energy Society Innovative Smart Grid Technologies Conference (ISGT) [C]. New Orleans: IEEE, 2022. 1-5.
 [14] Irudayaraj A X R, Wahab N I A, Premkumar M, et al. Renewable sources-based automatic load frequency control of interconnected systems using chaotic atom

- search optimization [J].Applied Soft Computing, 2022, 119:108574.
- [15] Du Y, Li F. Intelligent multi-microgrid energy management based on deep neural network and model-free reinforcement learning [J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2019, 11(2):1066-1076.
- [16] Yan Z, Xu Y. A multi-agent deep reinforcement learning method for cooperative load frequency control of a multi-area power system [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2020, 35(6):4599-4608.
- [17] 李志军, 王硕, 张家安, 等. 基于变论域模糊逻辑的互联电力系统负荷频率控制 [J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(16):151-160.
- [18] Bu X, Yu W, Cui L, et al. Event-triggered data-driven load frequency control for multiarea power systems [J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2021, 18(9):5982-5991.
- [19] 练红海, 覃事刚, 肖伸平, 等. 考虑通信时滞和采样周期的电力系统负荷频率控制 [J]. 控制理论与应用, 2023, 40(5):891-902.

Data-driven load frequency control for multi-area interconnected power system with wind penetration under power market

Zeng Yiming¹, Bu Xuhui¹, Yin Yanling²

(1.School of Electrical Engineering and Automation, Henan Key Laboratory of Intelligent Detection and Control of Coal Mine Equipment, Henan Polytechnic University, Jiaozuo 454003, China; 2.Center for Energy Economics, Henan Polytechnic University, School of Business Administration, Henan Polytechnic University, Jiaozuo 454003, China)

Abstract: With the deregulation of the power sector, the power exchange between regions of the power system becomes more frequent, and the stability of the new energy power system is also affected. In order to solve the regional power market power trading and denial of service attacks on the interference of wind power system, a data-driven load frequency control method is designed in this paper. An improved model-free adaptive control algorithm is designed by collecting the input and output data and estimating the pseudo-partial derivative using the compact form dynamic linearization, the anti-saturation compensation control algorithm is introduced to solve the output disfollowing problem caused by input saturation, and the stability of the control algorithm is proved theoretically. Finally, taking three-region wind power system as an example, the validity of the proposed algorithm is verified by MATLAB simulation.

Keywords: power market; wind power system; load frequency control; model-free adaptive control