

# 控制与决策

Control and Decision

## 含混合储能的互联电力系统传感器容错负荷频率控制

张逸为, 许德智, 杨玮林, 毕恺韬, 颜文旭

引用本文:

张逸为, 许德智, 杨玮林, 等. 含混合储能的互联电力系统传感器容错负荷频率控制[J]. *控制与决策*, 2021, 36(5): 1069–1077.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.1432>

---

## 您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

### 具有不确定丢包率和时变采样周期的Delta算子系统故障检测

Fault detection for delta operator systems with uncertain packet dropout rate and time-varying sampling periods

控制与决策. 2021, 36(5): 1101–1109 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.1154>

### 多航天器系统分布式固定时间输出反馈姿态协同跟踪控制

Distributed fixed-time output feedback attitude coordination tracking control for multiple rigid spacecraft

控制与决策. 2021, 36(5): 1049–1058 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.0968>

### 输入饱和的充液航天器抗干扰有限时间滑模控制

Anti-disturbance finite-time sliding mode control for liquid-filled spacecraft with input saturation

控制与决策. 2021, 36(5): 1078–1086 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.0820>

### 四旋翼无人机抗干扰轨迹跟踪控制

Anti-interference trajectory tracking control of quadrotor UAV

控制与决策. 2021, 36(2): 379–386 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.0875>

### 标签Petri网的路径信息在故障诊断中的应用

Application of path information of labeled Petri nets in fault diagnosis

控制与决策. 2021, 36(2): 325–334 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.0698>

# 含混合储能的互联电力系统传感器容错负荷频率控制

张逸为, 许德智<sup>†</sup>, 杨玮林, 毕恺韬, 颜文旭

(江南大学 物联网工程学院, 江苏 无锡 214112)

**摘要:** 为了改善多区域互联系统电能质量的问题, 在原有负荷频率控制系统(LFC)的基础上引入由超级电容和蓄电池两者组成的混合储能系统(HESS), 并针对电力系统中难以避免的传感器故障问题设计传感器主动容错策略. 首先, 建立含 HESS 的 LFC 系统模型用以减少负荷扰动对系统频率带来的影响; 其次, 针对带 HESS 的互联电力系统设计传感器主动容错策略, 避免因传感器故障而引发的系统故障; 最后, 通过对一个三区域带 HESS 的互联系统进行仿真实验, 验证 HESS 对改善互联系统电能质量的可行性和所提出的容错控制(FTC)的有效性.

**关键词:** 容错控制; 负荷频率控制; 混合储能; 互联电力系统; 滑模观测器; 传感器故障

中图分类号: TP273

文献标志码: A

DOI: 10.13195/j.kzyjc.2019.1432

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



**引用格式:** 张逸为, 许德智, 杨玮林, 等. 含混合储能的互联电力系统传感器容错负荷频率控制[J]. 控制与决策, 2021, 36(5): 1069-1077.

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

ZHANG Yi-wei, XU De-zhi<sup>†</sup>, YANG Wei-lin, BI Kai-tao, YAN Wen-xu

(School of Internet of Things Engineering, Jiangnan University, Wuxi 214122, China)

**Abstract:** To improve the power quality of the multi-area interconnected power grid, a hybrid energy storage system (HESS) consisting of super capacitor and battery is applied to the traditional load frequency control (LFC) systems. In addition, an active fault-tolerant strategy is designed for the unavoidable sensor failure in power systems. To reduce the impact of disturbances on system frequency, the model of the LFC system with the HESS is established first. Then, an active fault-tolerant strategy is designed for the interconnected power system with the HESS to avoid system error caused by sensor fault. Finally, a three-area power system with the HESS is simulated to verify the feasibility of the HESS to improve the power quality of the interconnected system and the effectiveness of the proposed fault-tolerant control (FTC).

**Keywords:** fault-tolerant control; load frequency control; hybrid energy storage; interconnected power system; sliding mode observer; sensor fault

## 0 引言

区别于传统集中式供电系统, 现代电力网络由多个互相连接的子系统组成, 各区域间高度互联, 通过各种通讯设备对电网进行保护、监测和控制<sup>[1]</sup>. 随着人们用电需求的不断增大, 负荷频率控制系统(load frequency control, LFC)的控制问题引起了学者的广泛关注和研究. 自 20 世纪 70 年代以来, 人们提出了各种 LFC 方法, 如经典控制、自适应控制、鲁棒控制、滑模控制、预测控制和人工智能控制等<sup>[2-7]</sup>.

然而, 近年来光电、风电的大量并网, 电动汽车充电桩的大规模投入使用等增加了电力系统中的不

确定因素, 带给电网出现频率稳定性问题. 随着储能技术研究的不断深入, 学者发现在现代电力系统中引入储能系统可以有效改善上述情况<sup>[8-10]</sup>. 在电力系统中, 储能系统主要用于平抑系统波动功率, 减少系统的剧烈振荡以及负荷功率曲线的峰谷差, 从而增强电网的电能质量<sup>[11]</sup>. 在众多储能设备中由超级电容和蓄电池两者相结合组成的混合储能系统(hybrid energy storage system, HESS)以其功率密度大、充放电时间短、可靠性高、循环寿命长的特点<sup>[12]</sup>更加适用于电力系统这样大功率、频繁充放电的场合. 目前, HESS 由于在技术上和经济上的优势, 已被广泛认

收稿日期: 2019-10-12; 修回日期: 2019-12-06.

基金项目: 国家自然科学基金项目(61973140, 61903158); 苏省自然科学基金项目(BK20180595, BK20200623); 中国博士后基金项目(245623).

责任编辑: 姜斌.

<sup>†</sup>通讯作者. E-mail: xudezhi@jiangnan.edu.cn.

为是平抑电网发电功率波动的有效办法。

在实际工程中,控制回路的传感器设备在正常运行过程中不可避免地会发生一些意外性变化,这可能会对系统性能产生负面影响,甚至导致运行过程出现故障问题,这些情况被定义为传感器故障<sup>[13]</sup>。实时检测控制系统中的故障并对其进行容错控制的问题也是近年来广大学者研究热点之一。文献[14]提出了一种基于滑模的非线性离散观测器用以故障诊断;文献[15]针对执行器故障和输入饱和的情况设计了鲁棒的自适应容错控制方案;文献[16]研究了系统不确定性和外部干扰问题,设计了鲁棒容错控制器并有效克服了环境干扰和系统不确定性的影响。除去电力系统本身庞大复杂的电力网络外,还通过一个复杂的通讯网络对电力系统进行运行、保护和控制。随着电力系统规模的扩大,系统的复杂性明显增加,如何提高电力系统运行的安全性和可靠性引起了人们的广泛关注。文献[17]研究了电力系统广域控制中传感器故障及其容错控制问题;文献[18]通过设计容错控制器用于改善电网中区域间振荡阻尼;而文献[19]则对多区域互联电力系统传感器故障进行了深入研

究。在电力系统中引入HES,其电能传输和分配都需要传感器对系统进行数据采集,然而设备故障难以避免。为解决这类问题,有必要对加入HES的LFC系统进行传感器主动容错控制。

本文首先在原有的LFC系统中引入HES,以保证电力系统有功功率平衡以及消除系统波动功率给电网带来的一系列负面影响;其次,针对所提出的带HES的多区域互联电力系统设计滑模观测器,用以故障估计和状态观测;最后,设计积分滑模容错控制器对传感器进行主动容错控制。

### 1 含混合储能的多区域互联电力系统

互联电力系统通常由多个控制区域构成,每个区域通过联络线连接到另一个区域,以克服发电和需求之间的任何不匹配。在传统的LFC系统中自动发电控制(automatic generation control, AGC)作为其二次控制器通过调节电厂调速器的设定值来调节电网频率<sup>[20]</sup>。为改善近年来大量新能源并网带来的电能质量不稳定,本文以三区域互联电力系统为例,对引入HES后的互联电力系统建立新的拓扑结构,其示意图如图1所示,数学模型如图2所示。各区域主要由发

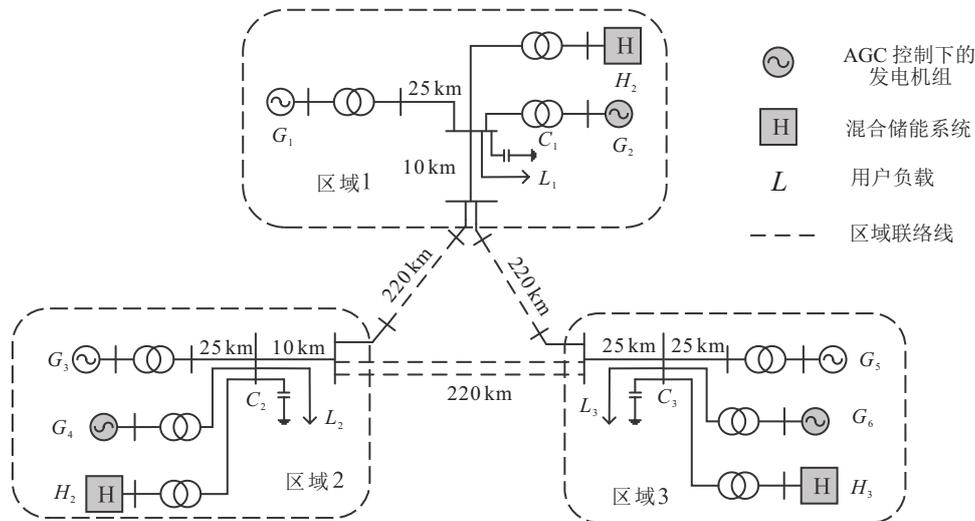


图1 含HES的三区域互联电力系统拓扑结构

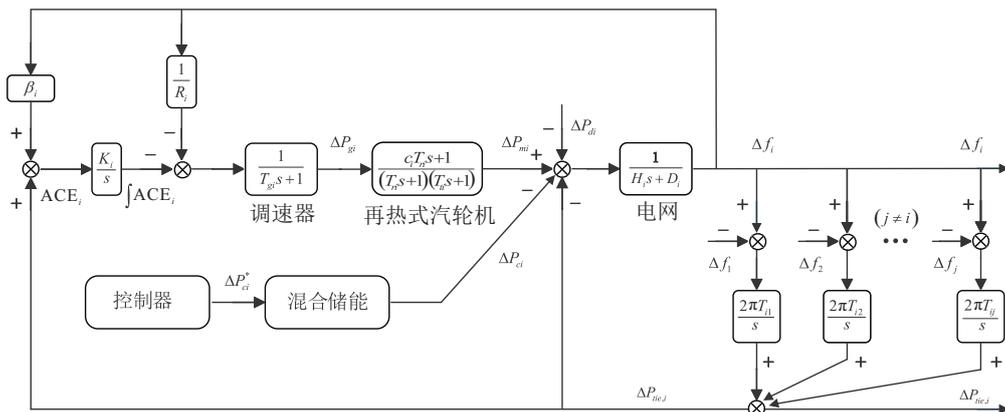


图2 控制区域i的传递函数模型

电系统、用户负载、HESS三部分组成,不同区域间通过联络线进行功率交换。

### 1.1 混合储能系统

为保证电力系统有功功率平衡,即电网频率稳定,以及消除系统波动功率给电网带来的负面影响,本文利用蓄电池和超级电容组成有源式混合储能系统<sup>[21]</sup>对电网波动功率进行调整,其基本结构如图3所示。

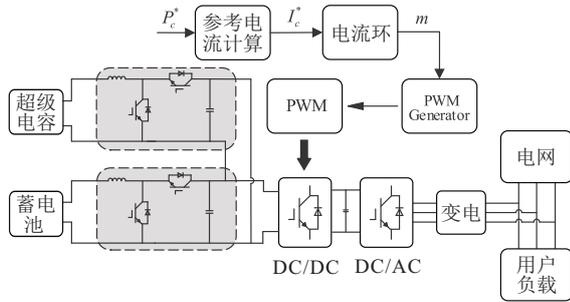


图3 HESS的基本结构

图3中 $P_c^*$ 为HESS中控制器根据电网频率波动而发出的功率指令,通过电流环控制产生DC/DC电路所需PWM波。DC/DC控制整个HESS的充放功率,根据给定的参考功率信号实现电网与HESS之间的双向潮流。HESS根据电网向用户侧发出实际功率偏离用户侧所需功率的情况,吸收或发出相应功率,以实现电网频率波动的平抑。

### 1.2 带混合储能的负荷频率控制系统

LFC控制系统作为保证系统电能质量的主要措施之一,其目的在于保证系统频率保持在标称频率<sup>[22]</sup>(50 Hz)允许变化范围内,使不同控制区域之间的联络功率最小。根据文献[20],互联电力系统中的每个区域由AGC系统、调速器、再热式汽轮机和电网组成,其各自传递函数模型如图2所示。在文献[20]所建立的传统LFC系统模型的基础上引入HESS系统,HESS系统根据原LFC系统采集的频率偏移量 $\Delta f$ 而吸收或发出相应功率,以起到参与电网调频的作用。因此,带混合储能的负荷频率控制系统在多区域电力系统中控制区域 $i$ 的传递函数模型如图2所示。其中出现的相关变量及其实际物理含义如下: $\Delta f_i$ 、 $\Delta P_{mi}$ 、 $\Delta P_{gi}$ 、 $\Delta ACE_i$ 和 $\Delta P_{tie,i}$ 分别为频率偏差、发电输出功率增量、调速器阀门位置增量、区域控制误差和联络线交换功率偏差; $T_{gi}$ 、 $T_{ri}$ 、 $T_{ti}$ 和 $T_{ij}$ 分别为调速器时间常数、再热时间常数、汽轮机时间常数和不同区域间联络线功率的同步系数; $H_i$ 、 $D_i$ 、 $c_i$ 、 $R_i$ 、 $\beta_i$ 和 $K_i$ 分别为机组惯量、机组阻尼系数、再热系数、调速增益、频率偏差设定和AGC内部PI调节控制系数。

为了方便采用状态空间方程的形式对互联电力系统建模,对再热式汽轮机的线性表达式可分解为如图4所示。

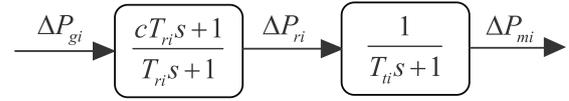


图4 控制区域 $i$ 中再热式汽轮机的传递函数

对带混合储能的LFC系统构建如下数学模型:

$$\begin{cases} \dot{x}_i(t) = A_i x_i(t) + B_i u_i(t) + B_i \Delta P_{di}(t) + \sum_{j \neq i}^N E_{ij} x_j(t), \\ y_i(t) = C_i x_i(t) + f_{si}(t). \end{cases} \quad (1)$$

其中

$$x_i(t) \triangleq$$

$$[\Delta f_i, \Delta P_{mi}, \Delta P_{ri}, \Delta P_{gi}, \int \Delta ACE_i dt, \Delta P_{tie,i}]^T,$$

$$A_i \triangleq$$

$$\begin{bmatrix} -\frac{D_i}{H_i} & \frac{1}{H_i} & 0 & 0 & 0 & -\frac{1}{H_i} \\ 0 & -\frac{1}{T_{ti}} & \frac{1}{T_{ti}} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{c_i}{R_i T_{gi}} & 0 & -\frac{1}{T_{ri}} & \frac{1}{T_{ri}} & -\frac{c_i}{T_{gi}} & -\frac{c_i}{T_{gi}} \\ -\frac{1}{R_i T_{gi}} & 0 & 0 & -\frac{1}{T_{gi}} & -\frac{1}{T_{gi}} & 0 \\ K_i \beta_i & 0 & 0 & 0 & 0 & K_i \\ \sum_{j \neq i}^N 2\pi T_{ij} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix},$$

$$E_{ij} \triangleq \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -2\pi T_{ij} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad B_i \triangleq \begin{bmatrix} \frac{1}{H_i} \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix};$$

$x_i(t)$ 为系统状态变量, $u_i(t) \triangleq \Delta P_{ci}$ 为HESS输入量, $\Delta P_{di}(t)$ 为扰动输入量, $y_i(t)$ 为传感器输出量, $f_{si}(t)$ 为传感器故障量。

## 2 传感器容错控制

为消除传感器故障量 $f_{si}(t)$ 对系统性能和稳定带来的一系列不良后果,针对本文所提出的含HESS的多区域互联电力系统,设计如图5所示的传感器主动容错策略。在原有的系统上增设滑模观测器,其中的故障观测部分时刻对传感器故障进行观测,一旦发生故障,故障观测部分将重构出故障并发出故障警

报,与此同时,积分滑模控制器根据观测的系统状态量对原系统进行传感器主动容错控制。

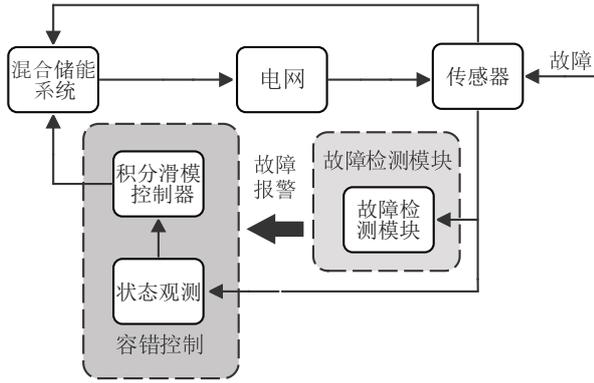


图5 传感器容错策略

**假设1** 负荷扰动有界,即 $\|\Delta P_{di}(t)\| \leq d_i$ ;传感器故障有界,即 $\|f_{si}(t)\| \leq \rho_i$ ;存在矩阵 $H_{ij}$ 使得 $E_{ij} = B_i H_{ij} C_j$ ,  $\|H_{ij}\| \leq \vartheta_{ij}$ . 其中 $d_i, \rho_i$ 和 $\vartheta_{ij}$ 为正数。

## 2.1 滑模观测系统设计

为了方便得到传感器故障与系统状态变量的估计值,设计如下增广系统:

$$\begin{cases} \bar{\varepsilon} \dot{\bar{x}}_i(t) = \bar{A}_i \bar{x}_i(t) + \bar{B}_i u_i(t) + \bar{B}_{Ni} \bar{f}_{si}(t) + \sum_{j \neq i}^N \bar{E}_{ij} \bar{x}_j(t), \\ y_i(t) = \bar{C}_i \bar{x}_i(t). \end{cases} \quad (2)$$

其中

$$\begin{aligned} \bar{x}_i(t) &\triangleq \begin{bmatrix} x_i(t) \\ f_{si}(t) \end{bmatrix}, \bar{A}_i \triangleq \begin{bmatrix} A_i & 0 \\ 0 & -I_p \end{bmatrix}, \bar{B}_i \triangleq \begin{bmatrix} B_i \\ 0_{p \times m} \end{bmatrix}, \\ \bar{E}_{ij} &\triangleq \bar{B}_{Ni} \bar{H}_{ij} \bar{C}_{Nj} \triangleq \begin{bmatrix} E_{ij} & 0 \\ 0 & 0_{p \times p} \end{bmatrix}, \bar{H}_{ij} \triangleq \begin{bmatrix} H_{ij} \\ 0_{p \times p} \end{bmatrix}, \\ \bar{B}_{Ni} &\triangleq \begin{bmatrix} B_i & 0_{n \times p} \\ 0_{p \times m} & I_p \end{bmatrix}, \bar{f}_{si}(t) \triangleq \begin{bmatrix} \Delta P_{di}(t) \\ f_{si}(t) \end{bmatrix}, \\ \bar{C}_i &\triangleq \begin{bmatrix} C_i & I_p \end{bmatrix}, \bar{\varepsilon} \triangleq \begin{bmatrix} I_n & 0 \\ 0 & 0_{p \times p} \end{bmatrix}. \end{aligned}$$

增广系统(2)等价于原动态系统(1),同时通过这种等价变换将原系统(1)中的传感器故障 $f_{si}(t)$ 当做一个状态量,如此可对增广系统(2)设计有效的状态观测策略,同时估计原始系统状态量和传感器故障量。

针对增广系统(2),构造一个如下形式的滑模状态观测器:

$$\begin{cases} \bar{S}_i \dot{\bar{z}}_i(t) = (\bar{A}_i - \bar{L}_{pi} \bar{C}_i) \bar{z}_i(t) + \bar{L}_{pi} y_i(t) + \bar{B}_i u_i(t) + \bar{L}_{si} u_{si}(t) + \sum_{j \neq i}^N \bar{E}_{ij} \hat{x}_j(t), \\ \hat{x}_i(t) = \bar{z}_i(t) + \bar{S}_i^{-1} \bar{L}_{Di} y_i(t). \end{cases} \quad (3)$$

其中: $\bar{z}_i(t)$ 为观测器的辅助状态变量; $\hat{x}_i(t)$ 为 $\bar{x}_i(t)$ 的估计值; $\bar{L}_{pi}$ 和 $\bar{L}_{Di}$ 为待求参数; $u_{si}(t)$ 是为了消除系统故障 $f_{si}(t)$ 的影响而引入的不连续滑模输入项; $\bar{L}_{si}$ 为待求输入项增益。

通过观察增广系统矩阵 $\bar{\varepsilon}$ 和 $\bar{C}_i$ ,可以得到如下秩关系:

$$\text{rank} \begin{bmatrix} \bar{\varepsilon} \\ \bar{C}_i \end{bmatrix} = \text{rank} \begin{bmatrix} I_n & 0 \\ 0 & 0_{p \times p} \\ \bar{C}_i & I_p \end{bmatrix} = n + p. \quad (4)$$

由式(4)可得,一定存在矩阵 $\bar{L}_{Di} \in \mathbf{R}^{(n+p) \times p}$ 使得 $\bar{S}_i \triangleq \bar{\varepsilon} + \bar{L}_{Di} \bar{C}_i$ 是可逆的。

由设计的观测器(3),可以得到

$$\begin{aligned} \bar{S}_i \dot{\hat{x}}_i(t) &= \bar{S}_i \dot{\bar{z}}_i(t) + \bar{L}_{Di} \dot{y}_i(t) = \\ &(\bar{A}_i - \bar{L}_{pi} \bar{C}_i) \hat{x}_i(t) + \bar{B}_i u_i(t) + \\ &\bar{L}_{pi} y_i(t) + \bar{L}_{si} u_{si}(t) + \bar{L}_{Di} \dot{y}_i(t) + \sum_{j \neq i}^N \bar{E}_{ij} \hat{x}_j(t). \end{aligned} \quad (5)$$

另一方面,在增广系统(2)的两端同时加上 $\bar{L}_{Di} \dot{y}_i(t)$ ,可以得到

$$\begin{aligned} \bar{S}_i \dot{\hat{x}}_i(t) &= \\ &(\bar{A}_i - \bar{L}_{pi} \bar{C}_i) \bar{x}_i(t) + \bar{B}_i u_i(t) + \bar{L}_{pi} y_i(t) + \\ &\bar{L}_{Di} \dot{y}_i(t) + \bar{B}_{Ni} \bar{f}_{si}(t) + \sum_{j \neq i}^N \bar{E}_{ij} \bar{x}_j(t). \end{aligned} \quad (6)$$

定义误差变量 $\bar{e}_i(t) \triangleq \hat{x}_i(t) - \bar{x}_i(t)$ ,根据式(5)和(6)得到误差动态系统

$$\begin{aligned} \dot{\bar{e}}_i(t) &= \bar{S}_i^{-1} \left[ (\bar{A}_i - \bar{L}_{pi} \bar{C}_i) \bar{e}_i(t) + \sum_{j \neq i}^N \bar{E}_{ij} \bar{e}_j(t) + \right. \\ &\left. \bar{L}_{si} u_{si}(t) - \bar{B}_{Ni} \bar{f}_{si}(t) \right]. \end{aligned} \quad (7)$$

## 2.2 误差系统稳定性分析

设计如下的滑模函数:

$$s_{ei}(t) = \bar{B}_{Ni}^T \bar{S}_i^{-T} P_i \bar{e}_i(t) = U_i \bar{C}_i \bar{e}_i(t). \quad (8)$$

其中: $U_i$ 为待求矩阵,矩阵 $P_i > 0$ 满足 $\bar{B}_{Ni}^T \bar{S}_i^{-T} P_i = U_i \bar{C}_i$ 的约束。

构造如下形式的滑模输入项

$$u_{si}(t) = -\phi_i \text{sgn}(s_{ei}(t)). \quad (9)$$

其中

$$\phi_i = \gamma_i - \rho_i - d_i + \sum_{j \neq i}^N \vartheta_{ij} \|\bar{C}_{Nj} \bar{e}_j(t)\|,$$

$\gamma_i > 0$ 是待求参数, $\bar{C}_{Nj} \triangleq [C_j, 0_{p \times p}]$ 。

**定理1** 如果非奇异矩阵 $P_i \in \mathbf{R}^{(n+p) \times (n+p)} > 0$ ,  $Y_i \in \mathbf{R}^{(n+p) \times (n+p)} > 0$ 和 $U_i \in \mathbf{R}^{(n+p) \times (n+p)} > 0$

使得如下约束成立:

$$\begin{cases} P_i \bar{S}_i^{-1} \bar{A}_i - Y_i \bar{C}_i + (P_i \bar{S}_i^{-1} \bar{A}_i - Y_i \bar{C}_i)^T < 0, \\ \bar{B}_{Ni}^T \bar{S}_i^{-T} P = U_i \bar{C}_i, \end{cases} \quad (10)$$

则在代入滑模输入项  $u_{si}(t)$  后误差动态系统是渐近稳定的. 进一步, 观测器增益  $\bar{L}_{pi}$  和  $\bar{L}_{si}$  可通过下式给出:

$$\bar{L}_{pi} = \bar{S}_i P_i^{-1} Y_i, \quad (11)$$

$$\bar{L}_{si} = \bar{S}_i P_i^{-1} \bar{C}_i^T U_i^T = \bar{B}_{Ni}. \quad (12)$$

**证明** 选择如下的Lyapunov函数:

$$V_e(t) \triangleq \bar{e}_i^T(t) P_i \bar{e}_i(t), \quad (13)$$

沿着误差动态系统(7)的状态轨迹对  $V_e(t)$  求导得

$$\begin{aligned} \dot{V}_e(t) = & \bar{e}_i^T(t) [P_i \bar{S}_i^{-1} \bar{A}_i - Y_i \bar{C}_i + (P_i \bar{S}_i^{-1} \bar{A}_i - \\ & Y_i \bar{C}_i)^T] \bar{e}_i(t) + 2\bar{e}_i^T(t) P_i \bar{S}_i^{-1} \left[ \sum_{j \neq i}^N \bar{E}_{ij} \bar{e}_j(t) - \right. \\ & \left. \bar{B}_{Ni} \bar{f}_{si}(t) + \bar{L}_{si} u_{si}(t) \right], \end{aligned} \quad (14)$$

其中  $Y_i \triangleq P_i \bar{S}_i^{-1} \bar{L}_{pi}$ .

由  $\bar{L}_{si} = \bar{S}_i P_i^{-1} \bar{C}_i^T U_i^T$  和  $\bar{B}_{Ni}^T \bar{S}_i^{-T} P = U_i \bar{C}_i$  可得

$$\begin{aligned} 2\bar{e}_i^T(t) P_i \bar{S}_i^{-1} \left[ \sum_{j \neq i}^N \bar{E}_{ij} \bar{e}_j(t) - \bar{B}_{Ni} \bar{f}_{si}(t) + \bar{L}_{si} u_{si}(t) \right] = & \\ 2\bar{e}_i^T(t) \bar{C}_i^T U_i^T u_{si}(t) + 2\bar{e}_i^T(t) \bar{C}_i^T U_i^T \times & \\ \left[ \sum_{j \neq i}^N \bar{H}_{ij} \bar{C}_{Nj} \bar{e}_j(t) - \bar{f}_{si}(t) \right] \leq & \\ -2\|s_{ei}(t)\| \left( \gamma_i - \rho_i - d_i + \sum_{j \neq i}^N \vartheta_{ij} \|\bar{C}_{Nj} \bar{e}_j(t)\| \right) - & \\ 2\|s_{ei}(t)\| \left( \rho_i + d_i - \sum_{j \neq i}^N \vartheta_{ij} \|\bar{C}_{Nj} \bar{e}_j(t)\| \right) \leq & \\ -2\gamma_i \|s_{ei}(t)\|. \end{aligned} \quad (15)$$

将式(15)代入(14)可得

$$\begin{aligned} \dot{V}_e(t) \leq & \bar{e}_i^T(t) [P_i \bar{S}_i^{-1} \bar{A}_i - Y_i \bar{C}_i + \\ & (P_i \bar{S}_i^{-1} \bar{A}_i - Y_i \bar{C}_i)^T] \bar{e}_i(t) - 2\gamma_i \|s_{ei}(t)\| \leq \\ & \bar{e}_i^T(t) [P_i \bar{S}_i^{-1} \bar{A}_i - Y_i \bar{C}_i + (P_i \bar{S}_i^{-1} \bar{A}_i - Y_i \bar{C}_i)^T] \bar{e}_i(t). \end{aligned} \quad (16)$$

因此, 当  $P_i \bar{S}_i^{-1} \bar{A}_i - Y_i \bar{C}_i + (P_i \bar{S}_i^{-1} \bar{A}_i - Y_i \bar{C}_i)^T < 0$  时, 必有  $\dot{V}_e(t) < 0$ , 从而证明了误差动态系统渐近稳

定.  $\square$

对于定理1中的  $\bar{B}_{Ni}^T \bar{S}_i^{-T} P = U_i \bar{C}_i$  不是线性矩阵不等式的形式, 无法通过Matlab的LMI工具箱进行求解, 对于  $\varepsilon_i > 0$ , 可建立如下矩阵不等式:

$$(\bar{B}_{Ni}^T \bar{S}_i^{-T} P - U_i \bar{C}_i)^T (\bar{B}_{Ni}^T \bar{S}_i^{-T} P - U_i \bar{C}_i) \leq \varepsilon_i I. \quad (17)$$

根据Schur引理, 式(17)等价于

$$\begin{bmatrix} -\varepsilon_i I & (\bar{B}_{Ni}^T \bar{S}_i^{-T} P - U_i \bar{C}_i)^T \\ * & -I \end{bmatrix} \leq 0. \quad (18)$$

根据以上变换, 问题转换为求满足上述线性矩阵不等式的  $\varepsilon_i$  最小值问题, 可用Matlab的LMI工具箱求解.

### 2.3 滑模面可达性分析

上一小节分析了误差动态系统(7)稳定的充分条件, 本节将分析误差动态系统中滑模面(8)的可达性问题.

选取如下的Lyapunov函数:

$$V_{se}(t) \triangleq \frac{1}{2} s_{ei}^T(t) (\bar{B}_{Ni}^T \bar{S}_i^{-T} P \bar{S}_i^{-1} \bar{B}_{Ni})^{-1} s_{ei}(t). \quad (19)$$

根据误差动态系统(7)和  $\bar{e}_i(t)$  的相应滑模函数(8), 可以得到

$$\begin{aligned} \dot{s}_{ei}(t) = & \bar{B}_{Ni}^T \bar{S}_i^{-T} P \bar{S}_i^{-1} \left[ (\bar{A}_i - \bar{L}_{pi} \bar{C}_i) \bar{e}_i(t) + \right. \\ & \left. \bar{L}_{si} u_{si}(t) + \sum_{j \neq i}^N \bar{E}_{ij} \bar{e}_j(t) - \bar{B}_{Ni} \bar{f}_{si}(t) \right]. \end{aligned} \quad (20)$$

从而有

$$\begin{aligned} \dot{V}_{se}(t) = s_{ei}^T(t) (\bar{B}_{Ni}^T \bar{S}_i^{-T} P \bar{S}_i^{-1} \bar{B}_{Ni})^{-1} \dot{s}_{ei}(t) = & \\ s_{ei}^T(t) \bar{B}_{Ni}^{-1} \left[ (\bar{A}_i - \bar{L}_{pi} \bar{C}_i) \bar{e}_i(t) + \sum_{j \neq i}^N \bar{E}_{ij} \bar{e}_j(t) + \right. & \\ \left. \bar{L}_{si} u_{si}(t) - \bar{B}_{Ni} \bar{f}_{si}(t) \right]. \end{aligned} \quad (21)$$

其中

$$\begin{aligned} s_{ei}^T(t) \bar{B}_{Ni}^{-1} \left[ \sum_{j \neq i}^N \bar{E}_{ij} \bar{e}_j(t) + \bar{L}_{si} u_{si}(t) - \bar{B}_{Ni} \bar{f}_{si}(t) \right] = & \\ s_{ei}^T(t) \left[ u_{si}(t) - \bar{f}_{si}(t) + \sum_{j \neq i}^N \bar{H}_{ij} \bar{C}_{Nj} \bar{e}_j(t) \right] < & \\ -\gamma_i \|s_{ei}(t)\|. \end{aligned} \quad (22)$$

所以有

$$\begin{aligned} \dot{V}_{se}(t) < & \|s_{ei}(t)\| \{ -\gamma_i + \|(\bar{B}_{Ni}^T \bar{S}_i^{-T} P \bar{S}_i^{-1} \bar{B}_{Ni})^{-1} \times \\ & \bar{B}_{Ni}^T \bar{S}_i^{-T} P \bar{S}_i^{-1} (\bar{A}_i - \bar{L}_{pi} \bar{C}_i)\| \| \bar{e}_i(t) \| \}. \end{aligned} \quad (23)$$

定义如下的空间域:

$$\Omega(\delta) \triangleq \{-\gamma_i + \|(B_{Ni}^T \bar{S}_i^{-T} P \bar{S}_i^{-1} \bar{B}_{Ni})^{-1} \times \bar{B}_{Ni}^T \bar{S}_i^{-T} P \bar{S}_i^{-1} (\bar{A}_i - \bar{L}_{pi} \bar{C}_i)\| \|\bar{e}_i(t)\| < 0\}. \quad (24)$$

定理1中证明了误差动态系统是稳定的,由式(23)可得,  $\bar{e}_i(t)$  的轨迹必然在有限时间抵达  $\Omega(\delta)$  并停留在其中. 如此证明了  $\bar{e}_i(t)$  的轨迹将在有限时间内抵达滑模面  $s_{ei}(t) = 0$ .

## 2.4 容错控制器设计

本节设计一个基于积分滑模的输出反馈容错控制器,用于对传感器故障进行主动调节,消除传感器故障对互联电力系统的影响.

将式(5)两边分别减去  $\bar{L}_{Di} \bar{C}_i \hat{x}_i(t)$ , 可得

$$\begin{aligned} \dot{\bar{e}}_i(t) = & \bar{A}_i \hat{x}_i(t) - \bar{L}_{pi} \bar{C}_i \bar{e}_i(t) + \bar{B}_i u_i(t) - \\ & \bar{L}_{Di} \bar{C}_i \dot{\bar{e}}_i(t) + \sum_{j \neq i}^N \bar{E}_{ij} \hat{x}_j(t) + \bar{L}_{si} u_{si}(t), \end{aligned}$$

于是有

$$\begin{aligned} \dot{\hat{x}}_i(t) = & A_i \hat{x}_i(t) - \bar{L}_{pi} \bar{C}_i \bar{e}_i(t) + B_i u_i(t) - \\ & \bar{L}_{Di} \bar{C}_i \dot{\bar{e}}_i(t) + \sum_{j \neq i}^N E_{ij} \hat{x}_j(t) + \bar{L}_{si} u_{si}(t). \quad (25) \end{aligned}$$

其中:  $\bar{L}_{pi}$ 、 $\bar{L}_{Di}$  和  $\bar{L}_{si}$  分别为  $\bar{L}_{pi}$ 、 $\bar{L}_{Di}$  和  $\bar{L}_{si}$  的前  $n$  项.

构造如下积分滑模面:

$$s_{xi}(t) = G_i \hat{x}_i(t) - \int_0^t G_i (A_i + B_i K_i) \hat{x}_i(\theta) d\theta, \quad (26)$$

其中  $G_i \triangleq B_i^\dagger$ .

所设计的控制器形式如下:

$$\begin{cases} u_i(t) = K_i \hat{x}_i(t) - \kappa_i s_{xi}(t) - \sigma_i(t) \text{sat}(s_{xi}(t)); \\ \text{sat}(s_{xi}(t)) = \begin{cases} \frac{s_{xi}(t)}{\varepsilon}, & \|s_{xi}(t)\| \leq \varepsilon; \\ \text{sign}(s_{xi}(t)), & \|s_{xi}(t)\| > \varepsilon. \end{cases} \end{cases} \quad (27)$$

其中

$$\begin{aligned} \sigma_i(t) = & \left( - \sum_{j \neq i}^N \vartheta_{ij} \|\bar{C}_{Nj} \bar{e}_j(t)\| - \chi_i(t) - \gamma_i + \rho_i + d_i \right), \\ \chi_i(t) = & \|B_i^\dagger \bar{L}_{pi} \bar{C}_i \bar{e}_i(t)\|, \quad \varepsilon > 0. \end{aligned}$$

**定理2** 在定理1得出的观测器参数基础上使用本文提出的积分滑模容错控制器(27),可以使互联电力系统在传感器发生故障的情况下,仍能保持渐近稳定.

**证明** 选择如下的Lyapunov函数:

$$V_{sx}(t) \triangleq 0.5 s_{xi}^T(t) s_{xi}(t). \quad (28)$$

根据式(26)设计的滑模函数  $s_{xi}(t)$  和式(25),可以得到

$$\begin{aligned} \dot{s}_{xi}(t) = & G_i \left\{ - \bar{L}_{pi} \bar{C}_i \bar{e}_i(t) + B_i \left[ u_i(t) - K_i \hat{x}_i(t) + \right. \right. \\ & \left. \left. \sum_{j \neq i}^N H_{ij} C_j \hat{x}_j(t) + u_{s1i}(t) \right] \right\}. \quad (29) \end{aligned}$$

由此可得

$$\begin{aligned} \dot{V}_{sx}(t) = & s_{xi}^T(t) G_i \left\{ - \bar{L}_{pi} \bar{C}_i \bar{e}_i(t) + B_i \left[ u_i(t) - \right. \right. \\ & K_i \hat{x}_i(t) + \sum_{j \neq i}^N H_{ij} C_j \hat{x}_j(t) + u_{s1i}(t) \left. \right\} \leq \\ & - \|s_{xi}(t)\| \|B_i^\dagger \bar{L}_{pi} \bar{C}_i \bar{e}_i(t)\| + s_{xi}^T(t) \left[ u_i(t) - \right. \\ & \left. K_i \hat{x}_i(t) + \sum_{j \neq i}^N H_{ij} C_j \hat{x}_j(t) + u_{s1i}(t) \right]. \quad (30) \end{aligned}$$

考虑到  $u_{si}(t)$  中

$$\begin{aligned} \|\bar{C}_{Nj} \bar{e}_j(t)\| = & \|C_j(\hat{x}_j(t) - x_j(t))\| \leq \\ & \|C_j \hat{x}_j(t)\| + \|C_j x_j(t)\|. \quad (31) \end{aligned}$$

因此,由式(27)、(30)和(31)可以得到:

当  $\|s_{xi}(t)\| > \varepsilon$  时,有

$$\dot{V}_{sx}(t) < -\kappa_i \|s_{xi}(t)\|; \quad (32)$$

当  $\|s_{xi}(t)\| \leq \varepsilon$  时,有

$$\begin{aligned} \dot{V}_{sx}(t) < & -\kappa_i \|s_{xi}(t)\| + \frac{\sigma_i(t)}{\varepsilon} [\|s_{xi}(t)\| \varepsilon - \|s_{xi}(t)\|^2]. \quad (33) \end{aligned}$$

结合(32)和(33),可以得到

$$\dot{V}_{sx}(t) < 0. \quad (34)$$

这表明:在定理1得出的观测器参数的基础上,本节所提出的容错控制器可以使带HESS的互联电力系统的各个区域系统都能在传感器发生故障时保持渐近稳定.  $\square$

## 3 仿真实验

为了验证本文所提出的混合储能系统参与改善互联电力系统电能质量策略的可行性和相应传感器容错控制策略的有效性,将通过以下两个仿真实验算例进行研究验证. 建立如图1形式的三区域含HESS的互联电力系统模型,系统模型参数以区域1为例,取值如表1所示,并设系统基准功率为1000 MW.



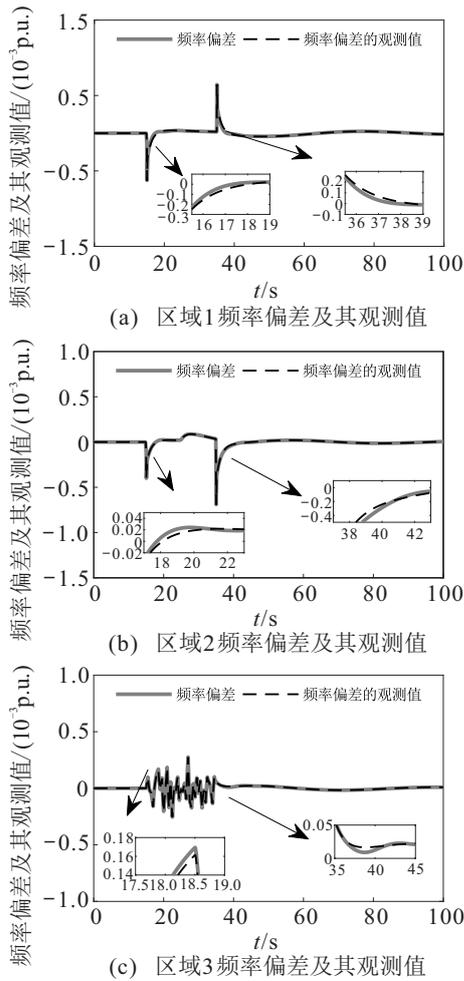


图8 各区域频率偏差及其观测值

图7展示不同区域传感器发生故障时滑模观测器对故障的识别和估计;图8展示的是滑模观测器对系统状态量频率偏差 $\Delta f$ 的估计;图9对比了当传感器故障后原系统和加入容错控制(fault tolerant control, FTC)的系统频率偏差 $\Delta f$ 的变化. 仿真结果表明加入本文设计的传感器容错策略后,故障及系统状态跟踪达到预期效果,能有效消除传感器故障带来的负面影响,保证了系统稳定.

#### 4 结论

本文在原有LFC系统的基础上引入了HESS,解决了在新能源并网和大量电动汽车充电桩投入使用而造成的电网频率波动过大的问题. 针对系统中难以避免的传感器故障问题,设计了滑模观测器对故障进行检测和系统状态量观测,利用LMI方法简化观测器参数选取过程. 此外,还提出了基于观测的FTC算法,利用积分滑模容错控制器对故障进行容错控制. 通过Matlab/Simulink对系统数学模型进行仿真验证,验证了所提出方案的可行性和有效性. 从仿真结果可以看出:在LFC系统上引入HESS可以有效平抑电网频率波动,保证系统电能质量;针对传感器故

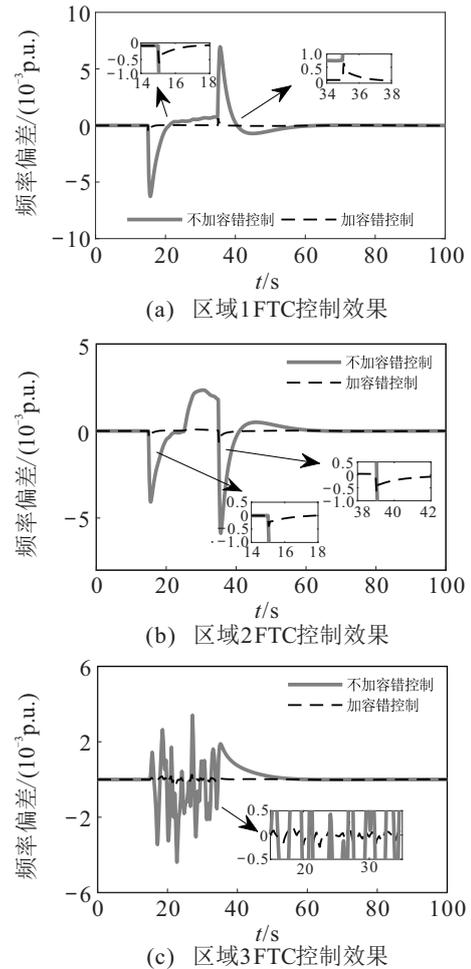


图9 各区域FTC控制效果

障问题所提出的主动容错控制策略,由于滑模观测器不连续输入量的存在能有效识别故障并且在故障发生时保持观测器系统稳定,基于观测的积分滑模容错控制器能及时抑制传感器故障对系统的影响,保证了系统的稳定性和可靠性.

#### 参考文献(References)

- [1] Ameli A, Hooshyar A, El-Saadany E F, et al. Attack detection and identification for automatic generation control systems[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2018, 33(5): 4760-4774.
- [2] Sabahi K, Sharifi A, Aliyari Sh M, et al. Load frequency control in interconnected power system using multi-objective PID controller[J]. Journal of Applied Sciences, 2008, 8(20): 3676-3682.
- [3] Rubaai A, Udo V. An adaptive control scheme for load-frequency control of multiarea power systems Part I. Identification and functional design[J]. Electric Power Systems Research, 1992, 24(3): 183-188.
- [4] Rahmani M, Sadati N. Hierarchical optimal robust load-frequency control for power systems[J]. Iet Generation Transmission & Distribution, 2012, 6(4): 303-312.
- [5] Mi Y, Fu Y, Wang C S, et al. Decentralized sliding mode

- load frequency control for multi-area power systems[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2013, 28(4): 4301-4309.
- [6] Kumtepli V, Wang Y, Tripathi A. Multi-area model predictive load frequency control: A decentralized approach[C]. 2016 Asian Conference on Energy, Power and Transportation Electrification (ACEPT). Singapore: IEEE, 2016.
- [7] Qian D W, Zhao D B, Yi J Q, et al. Neural sliding-mode load frequency controller design of power systems[J]. Neural Computing and Applications, 2013, 22(2): 279-286.
- [8] 胡泽春, 谢旭, 张放, 等. 含储能资源参与的自动发电控制策略研究[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(29): 5080-5087.  
(Hu Z C, Xie X, Zhang F, et al. Research on automatic generation control strategy incorporating energy storage resources[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(29): 5080-5087.)
- [9] 胡泽春, 夏睿, 吴林林, 等. 考虑储能参与调频的风储联合运行优化策略[J]. 电网技术, 2016, 40(8): 2251-2257.  
(Hu Z C, Xia R, Wu L L, et al. Joint operation optimization of wind-storage union with energy storage participating frequency regulation[J]. Power System Technology, 2016, 40(8): 2251-2257.)
- [10] 丁冬, 刘宗歧, 杨水丽, 等. 基于模糊控制的电池储能系统辅助AGC调频方法[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(8): 81-87.  
(Ding D, Liu Z Q, Yang S L, et al. Battery energy storage aid automatic generation control for load frequency control based on fuzzy control[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(8): 81-87.)
- [11] Xu D Z, Liu J X, Yan X G, et al. A novel adaptive neural network constrained control for multi-area interconnected power system with hybrid energy storage[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2018, 65(8): 6625-6634.
- [12] Cao J, Emadi A. A new battery/UltraCapacitor hybrid energy storage system for electric, hybrid, and plug-in hybrid electric vehicles[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2012, 27(1): 122-132.
- [13] Yin S, Gao H J, Qiu J B, et al. Descriptor reduced-order sliding mode observers design for switched systems with sensor and actuator faults[J]. Automatica, 2017, 76: 282-292.
- [14] Jiang B, Shi P, Mao Z H. Sliding mode observer-based fault estimation for nonlinear networked control systems[J]. Circuits, Systems, and Signal Processing, 2011, 30(1): 1-16.
- [15] Hu Q L, Shao X D, Guo L. Adaptive fault-tolerant attitude tracking control of spacecraft with prescribed performance[J]. ASME Transactions on Mechatronics, 2018, 23(1): 331-341.
- [16] Hu Q L, Shi Y X, Shao X D. Adaptive fault-tolerant attitude control for satellite reorientation under input saturation[J]. Aerospace Science and Technology, 2018, 78: 171-182.
- [17] Felix Rafael Segundo Sevilla. Fault-tolerant wide-area control of power systems[D]. London: Department of Electrical and Electronic Engineering, Imperial College London, 2013.  
Sevilla S, Rafael F, et al. Fault-tolerant wide-area control of power systems[J]. Imperial College London, 2013.
- [18] Segundo Sevilla F R, Jaimoukha I, Chaudhuri B, et al. Fault-tolerant control design to enhance damping of inter-area oscillations in power grids[J]. International Journal of Robust & Nonlinear Control, 2014, 24(8/9): 1304-1316.
- [19] Su X, Liu X, Song Y. Fault-tolerant control of multi-area power systems via sliding mode observer technique[J]. ASME Transactions on Mechatronics, 2018, 23(1): 38-47.
- [20] Wood A J, Wollenberg B F. Power generation, operation, and control[M]. New York: Wiley, 2012: 485-497.
- [21] Shankar R, Chatterjee K, Bhushan R. Impact of energy storage system on load frequency control for diverse sources of interconnected power system in deregulated power environment[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2016, 79: 11-26.
- [22] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. 电能质量电力系统频率偏差: GB/T 15945-2008[S]. 北京: 中国标准出版社, 2008.  
(General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, Standardization Administration. Power quality-frequency deviation for power system: GB/T 15945-2008[S]. Beijing: China Standard Press, 2008.)

### 作者简介

张逸为(1995—), 男, 硕士生, 从事智能电网技术、故障诊断与容错控制的研究, E-mail: 6181915017@stu.jiangnan.edu.cn;

许德智(1985—), 男, 副教授, 博士, 从事故障诊断与容错控制、数据驱动控制等研究, E-mail: xudezhi@jiangnan.edu.cn;

杨玮林(1987—), 男, 副教授, 博士, 从事电力系统运行与控制、电机驱动等研究, E-mail: wlyang@jiangnan.edu.cn;

毕恺韬(1989—), 男, 副教授, 博士, 从事微电网技术、电机驱动等研究, E-mail: bkt1989@163.com;

颜文旭(1971—), 男, 教授, 博士, 从事可再生能源、智能电网等研究, E-mail: ywx03@163.com.

(责任编辑: 孙艺红)