

## 基于滑模控制的含风储多域电力系统负荷频率控制

米 阳<sup>†</sup>, 郝学智, 刘红业, 张恒一, 李战强, 纪宏澎

(上海电力学院 电气工程学院, 上海 200090)

**摘 要:** 建立含风储多域互联电力系统负荷频率控制(LFC)模型,同时考虑系统参数不确定性、储能系统和传统机组控制信道延时问题.为提高系统鲁棒性,降低储能系统的容量配置,针对含风储的LFC模型,设计滑模负荷频率控制器,并提出滑模负荷频率控制器和储能协调的控制策略.算例分析表明,所提出的协调控制策略在新能源大规模渗透和系统负荷波动情况下能够有效减小系统频率偏差和区域控制偏差,同时降低储能系统的配置容量,提高电力系统安全稳定运行的经济性.

**关键词:** 储能; 参数不确定性; 延时; 滑模控制器; 负荷频率控制

中图分类号: TM614

文献标志码: A

## Multi-area power system with wind power and energy storage system load frequency control based on sliding model control

MI Yang<sup>†</sup>, HAO Xue-zhi, LIU Hong-ye, ZHANG Heng-yi, LI Zhan-qiang, JI Hong-peng

(School of Electric Power Engineering, Shanghai University of Electric Power, Shanghai 200090, China)

**Abstract:** In this paper, a multi-area interconnected power system load frequency control(LFC) model with a wind turbine and energy storage system(ESS) is established. Meanwhile, the system parameter uncertainties and the time delay of control channel in the ESS and traditional generator are considered. In order to improve the robustness of the power system and reduce the capacity of the ESS, a sliding model load frequency controller is designed for the LFC model with the wind turbine and ESS, and a coordination control strategy for the sliding model load frequency controller and ESS is proposed. The simulation result verifies that the proposed coordination control strategy can reduce the system frequency deviation and area control error effectively under the increase of new energy penetration and system load fluctuation, and decrease the capacity of the ESS, thus improve the economic performance of the power system.

**Keywords:** energy storage system; parameter uncertainties; time delay; sliding model controller; load frequency control

### 0 引 言

频率是衡量电力系统稳定运行的一个重要指标.为保证电力系统的电能质量,必须实现电力系统运行过程中的有功平衡.风力发电由于是零污染零排放,在世界范围内得到了快速发展,但是随着风电的大规模接入,不仅降低了整个电力系统的频率响应惯性,而且由于其间歇性和不可预测性增加了系统频率控制的难度<sup>[1]</sup>.

电力系统频率调节有3种方式:一是通过配置储能维持系统有功平衡;二是通过控制传统发电机组来维持频率稳定;三是新能源发电参与电力系统频

率调节.第3种调频方式目前正处于研究阶段,尚未得到广泛应用,因此本文只研究前两种调频手段.随着储能系统技术的进步和成本的降低,越来越多的新型储能系统接入电网中<sup>[2]</sup>.文献[3]针对风储联合运行电力系统,提出了利用储能减小弃风的频率优化控制策略.文献[4]提出一种基于模糊控制策略的电池储能系统辅助自动发电控制系统调频方法.尽管储能系统具有快速、准确的功率响应能力,能够对电力系统的频率变化作出快速响应,但是伴随着波动性新能源的大规模渗透,如果仅依靠储能系统调节系统频率,则需要配置大容量的储能装置,这样会增加电力

收稿日期: 2017-07-27; 修回日期: 2017-11-02.

基金项目: 国家自然科学基金项目(61403246); 中国博士后科学基金项目(2014M560187); 上海教委科研创新项目(15ZZ085); 上海绿色能源并网工程技术研究中心项目(13DZ2251900); “电气工程”上海市II类高原学科项目; 上海市电站自动化技术重点实验室项目.

责任编委: 牛玉刚.

作者简介: 米阳(1976—),女,教授,博士,从事微网控制、电力系统稳定控制等研究; 郝学智(1991—),女,硕士生,从事电力系统稳定与控制的研究.

<sup>†</sup>通讯作者. E-mail: miyangmi@163.com.

系统的建设成本,影响新能源的大规模上网。

随着开放型通信网络信息传输技术的应用,储能系统和传统机组的控制通道中存在不可避免的延时问题,加剧了系统频率调节的难度。PI控制算法是优化传统电力系统负荷频率的主要手段<sup>[5]</sup>。随着电力系统结构日趋复杂,新能源发电比例的增加和电力系统自身负荷的波动,使得系统中存在大量的结构和参数不确定性,从而降低了系统负荷频率控制的精度和速度。为此,国内外学者们不断改进PI负荷频率控制策略,并将模糊控制、神经网络、自适应控制等<sup>[6-8]</sup>先进控制理论应用于系统负荷频率控制中。这些方法在一定程度上提高了电力系统运行的稳定性,但是其存在算法复杂不利于工程实现等问题。滑模控制算法对系统参数摄动和外界干扰具有不敏感性,可用来提高电力系统的鲁棒性,并且理论设计简单便于工程应用<sup>[9]</sup>。文献[10-11]分别对单域和多域电力系统设计了滑模负荷频率控制器。但是当电力系统中负荷扰动较大且风能渗透率较高时,受传统发电机发电率约束的限制,只通过控制算法作用于汽轮机,不能有效维持电力系统有功平衡和频率稳定,因此,需要配置适当容量的储能设备与滑模负荷频率控制器协调优化系统频率。

基于以上分析,本文建立了含风电和储能的多域互联电力系统LFC模型,并考虑了储能系统和传统机组控制信道延时问题。为提高电力系统的鲁棒性,针对含风储的多域时滞互联LFC模型,设计滑模负荷频率控制器,并提出了多域电力系统滑模负荷频率控制器和储能协调优化系统负荷频率的控制策略。最后基于Matlab仿真平台搭建算例模型,对所提出的协调策略进行验证。仿真结果表明,本文所提出的策略能够有效地减小系统频率偏差和区域控制偏差,提高电力系统的鲁棒性。此外,该方案与配置储能系统的传统PI负荷频率控制相比,能够明显减小储能设备配置的容量,从而有效降低电力系统稳定运行的建设成本。

## 1 电力系统模型

本文研究对象在传统互联LFC模型的基础上考虑了风力发电对系统稳定运行的影响,并配置了电池储能系统优化系统负荷频率。各模型的建立如下所示。

### 1.1 电池储能系统模型

电池储能系统的辅助调频作用主要通过变流器与电网交换有功功率实现。储能系统通过其充放电

功能平衡电力系统的发电供给和负荷需求,并参与系统频率调节,抑制频率的大幅度波动<sup>[12]</sup>。研究电池储能系统参与系统频率调节,必须建立适合调频研究需求的仿真模型。当电池储能系统用于调频时,跟踪控制信号控制其进行充放电的过程需要一定的响应时间,因此,可采用一阶惯性环节进行描述<sup>[13]</sup>。电池储能系统的传递函数模型 $N(s)$ 表示为

$$N(s) = \frac{1}{1 + sT_{ESi}}, \quad (1)$$

其中 $T_{ESi}$ 为功率转换系统的时间常数。

由于储能系统跟踪控制信号的传输存在不可避免的延时,在建模中考虑了储能系统的控制信道延时问题,并通过时滞环节表示。储能系统的动作时机和容量配置已在文献[14]中作了详细介绍,限于篇幅,本文不再详述。

### 1.2 风机数学模型

鼠笼型感应风力发电机因具有结构简单、可靠性高、成本较低的特点而得到广泛应用。风机捕获的气动功率 $P_{wi}$ <sup>[15-16]</sup>可表示为

$$P_{wi} = \frac{1}{2} \rho \pi R^2 V_w^3 C_p(\lambda, \beta). \quad (2)$$

其中: $V_w$ 为风速; $\rho$ 为空气密度; $R$ 为风轮桨叶半径; $C_p(\lambda, \beta)$ 为风能利用系数; $\beta$ 为桨距角; $\lambda = \frac{R\omega}{V_w}$ 为叶尖速比; $\omega$ 为涡轮叶片角速度,有

$$\omega^2 = \int \frac{2}{J} (P_{wi} - P_{gi}) dt, \quad (3)$$

$J$ 为系统的等效总转动惯量。

当风机与发电机相连时,由于风机转动惯量远大于发电机,可近似忽略发电机暂态过程,发电机的输出功率 $P_{gi}$ 为

$$P_{gi} = \frac{-3V^2 s(1+s)R_2}{(R_2 - sR_1)^2 + s^2(X_1 + X_2)^2}. \quad (4)$$

其中: $V$ 为相电压; $R_1$ 为定子电阻, $R_2$ 为转子电阻; $X_1$ 为定子电抗, $X_2$ 为转子电抗;转差率为 $s = (\omega_0 - \omega)/\omega_0$ , $\omega_0$ 为同步角速度。

### 1.3 含风储的互联电力系统LFC模型

电力系统具有非线性和时变特性,但在稳定运行情况下,负荷变化范围较小,因此可以在系统稳定运行点附近进行线性化。在分析电力系统的负荷频率控制时,关注的是电力系统所有发电机的整体性能。因此,模型中忽略同步发电机的电压和功角的动态特性以及机间振荡,并用代表其整体性能的一台发电机等效表示。计及风储的互联电力系统LFC模型如图1所示。

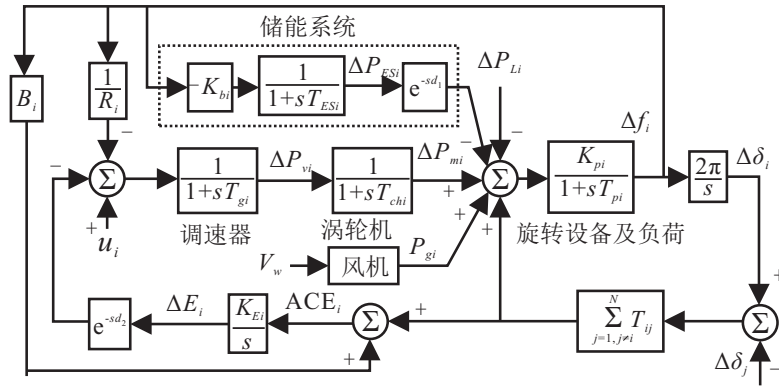


图 1 计及风储的互联电力系统LFC仿真模型

图1中:  $i = 1, 2, \dots, N, j = 1, 2, \dots, N, N$  为区域个数;  $\Delta f_i$  为区域系统频率偏差;  $\Delta P_{mi}$  为同步发电机输出功率增量;  $\Delta P_{vi}$  为调节阀位置增量;  $\Delta E_i$  为频率偏差积分控制器增量;  $ACE_i$  为区域控制偏差;  $\Delta \delta_i$  为相角增量;  $\Delta P_{ESi}$  为储能系统动作深度;  $\Delta P_{Li}$  为系统负荷有功变化量;  $T_{pi}$  和  $K_{pi}$  为系统时间常数和增益;  $T_{chi}$  为汽轮机时间常数;  $T_{gi}$  为调速器时间常数;  $R_i$  为调速器速率调节;  $K_{Ei}$  为积分控制增益;  $B_i$  为区域频率偏移系数;  $u_i$  为滑模负荷频率控制量;  $K_{bi}$  为储能系统的单位调节功率系数;  $d_1$  为表示储能系统的时滞常数;  $d_2$  为传统机组的时滞常数;  $T_{ij}$  为两区域之间的联络线功率同步因数。

## 2 应用环境负荷频率控制器设计

### 2.1 传统PI负荷频率控制器

在多域互联电力系统中,PI控制器以区域控制偏差  $ACE_i$  为输入量,经PI运算后加以放大,其输出信号驱动油动机执行机构,使汽轮机的蒸汽阀门按设定的方向动作。

传统的PI控制是误差信号的比例、积分的简单线性组合,结构简单、参数易于调整.但PI控制算法需在系统稳定工作点附近使用,新能源发电和系统负荷波动的随机性,使得电力系统参数和稳定运行点变化相对较大,在频率的瞬态响应过程中,PI控制系统稳定的响应时间较长,超调量较大.然而,滑模控制对系统参数摄动和外界干扰具有不敏感性,可有效提高系统的鲁棒性。

### 2.2 滑模负荷频率控制器设计

滑模控制算法具有较强的鲁棒性,特别是当系统状态运动到滑动模态时,对系统参数摄动和外界干扰具有不敏感性<sup>[17]</sup>.滑模控制器设计包含两个内容:1)切换面设计,保证滑模动态的稳定性;2)控制器设计,保证系统在有限时间内到达切换面。

由计及风储的互联电力系统LFC模型,建立如下状态方程:

$$\begin{aligned} \dot{\Delta f}_i(t) = & -\frac{1}{T_{pi}} \Delta f_i(t) + \frac{K_{pi}}{T_{pi}} \Delta P_{mi}(t) + \frac{K_{pi}}{T_{pi}} \times \\ & \Delta P_{ESi}(t - d_1) - \frac{K_{pi}}{T_{pi}} \{ \Delta P_{Li}(t) - P_{gi}(t) \} - \\ & \frac{K_{pi}}{T_{pi}} \sum_{j=1, j \neq i}^N T_{ij} \times \{ \Delta \delta_i(t) - \Delta \delta_j(t) \}, \end{aligned} \quad (5)$$

$$\dot{\Delta P}_{mi}(t) = -\frac{1}{T_{chi}} \Delta P_{mi}(t) + \frac{1}{T_{chi}} \Delta P_{vi}(t), \quad (6)$$

$$\begin{aligned} \dot{\Delta P}_{vi}(t) = & -\frac{1}{T_{gi} R_i} \Delta f_i(t) - \frac{1}{T_{gi}} \Delta P_{vi}(t) + \\ & \frac{1}{T_{gi}} u_i(t) - \frac{1}{T_{gi}} \Delta E_i(t - d_2), \end{aligned} \quad (7)$$

$$\begin{aligned} \dot{\Delta E}_i(t) = & K_{Ei} \sum_{j=1, j \neq i}^N T_{ij} \{ \Delta \delta_i(t) - \Delta \delta_j(t) \} + \\ & K_{Ei} B_i \Delta f_i(t), \end{aligned} \quad (8)$$

$$\dot{\Delta \delta}_i(t) = 2\pi \Delta f_i(t), \quad (9)$$

$$\dot{\Delta P}_{ESi}(t) = \frac{K_{bi}}{T_{ESi}} \Delta f_i(t) - \frac{1}{T_{ESi}} \Delta P_{ESi}(t). \quad (10)$$

将式(5)~(10)表示为如下向量模型:

$$\begin{aligned} \dot{x}_i = & A_i x_i(t) + B_i u_i(t) + A_{id1} x_i(t - d_1) + \\ & A_{id2} x_i(t - d_2) + \sum_{j=1, j \neq i}^N E_{ij} x_j(t) + \\ & F_i \{ \Delta P_{Li}(t) - \Delta P_{gi}(t) \}. \end{aligned} \quad (11)$$

电力系统中的负荷是不断变化的,导致系统的平衡工作点也随之改变,从而使得电力系统参数具有不确定性.为了更准确地描述电力系统,状态方程(11)可以扩展为如下包含参数不确定项模型,即

$$\begin{aligned} \dot{x}_i(t) = & (A_i + \Delta A_i) x_i(t) + (B_i + \Delta B_i) u_i(t) + \end{aligned}$$

$$(A_{id1} + \Delta A_{id1})x_i(t - d_1) + (A_{id2} + \Delta A_{id2}) \times x_i(t - d_2) + \sum_{j=1, j \neq i}^N (E_{ij} + \Delta E_{ij})x_j(t) + (F_i + \Delta F_i)\{\Delta P_{Li}(t) - P_{gi}(t)\}. \quad (12)$$

其中

$x_i = [\Delta f_i \ \Delta P_{mi}(t) \ \Delta P_{vi}(t) \ \Delta E_i(t) \ \Delta \delta_i(t) \ \Delta P_{ESi}(t)]^T$ ,  $A_i$  为系统矩阵,  $B_i$  为输入矩阵,  $A_{id1}$  为储能系统时滞项系数矩阵,  $A_{id2}$  为传统机组时滞项系数矩阵,  $F_i$  为扰动项系数矩阵,  $E_{ij}$  为互联项系数矩阵,  $\Delta A_i$ 、 $\Delta B_i$ 、 $\Delta A_{id1}$ 、 $\Delta A_{id2}$ 、 $\Delta F_i$  和  $\Delta E_{ij}$  为参数不确定项。

为方便设计滑模控制器, 集结参数不确定项, 系统(12)可表示为

$$\dot{x}_i(t) = A_i x_i(t) + B_i u_i(t) + A_{id1} x_i(t - d_1) + A_{id2} x_i(t - d_2) + \sum_{j=1, j \neq i}^N E_{ij} x_j(t) + g_i(t). \quad (13)$$

对上述系统作如下基本假设<sup>[11,18]</sup>.

**假设1**  $(A_i, B_i)$  可控,  $\text{rank}(B_i) = m_i$ , 其中  $i = 1, 2, \dots, N$ .

**假设2**  $\text{rank}(B_i, g_i) \neq \text{rank}(B_i)$ , 即系统不确定项是非匹配的。

**假设3** 集结不确定项  $g_i(t)$  有界, 满足  $\|g_i(t)\| \leq h_i$ . 其中:  $\|\cdot\|$  为矩阵范数,  $h_i$  为大于零的常数,  $i = 1, 2, \dots, N$ .

**假设4** 互联项系数矩阵  $E_{ij}$  和时滞项系数矩阵  $A_{id1}$ ,  $A_{id2}$  是有界的, 存在有界常数  $\alpha, \beta, \gamma$ , 使得

$$\|E_{ij}\| \leq \gamma, \|A_{id1}\| \leq \alpha, \|A_{id2}\| \leq \beta.$$

其中:  $\alpha > 0, \beta > 0, \gamma > 0$ .

### 2.2.1 切换面设计

在假设1中  $\text{rank}(B_i) = m_i$  成立的条件下, 存在一个可逆矩阵  $T_i \in R^{(n_i \times n_i)}$ , 对于系统(13), 进行非奇异线性变换, 使  $z_i(t) = T_i x_i(t)$ , 则系统(13)转换为如下标准型<sup>[19]</sup>:

$$\dot{z}_i(t) = \begin{bmatrix} \dot{z}_{i1}(t) \\ \dot{z}_{i2}(t) \end{bmatrix} = T_i \dot{x}_i(t) = T_i A_i x_i(t) + T_i B_i u_i(t) + T_i \sum_{j=1, j \neq i}^N E_{ij} x_j(t) + T_i g_i(t) + T_i A_{id1} x_i(t - d_1) + T_i A_{id2} x_i(t - d_2) = G_i z_i(t) + H_i u_i(t) + \sum_{j=1, j \neq i}^N \Gamma_{ij} z_j(t) + F_i(t) +$$

$$N_i z_i(t - d_1) + M_i z_i(t - d_2) = \begin{bmatrix} G_{i1} & G_{i2} \\ G_{i3} & G_{i4} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} z_{i1}(t) \\ z_{i2}(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ H_{i2} \end{bmatrix} u(t) + \sum_{j=1, j \neq i}^N \begin{bmatrix} \Gamma_{ij1} z_{j1}(t) \\ \Gamma_{ij2} z_{j2}(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} N_{i1} z_{i1}(t - d_1) \\ N_{i2} z_{i2}(t - d_1) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} M_{i1} z_{i1}(t - d_2) \\ M_{i2} z_{i2}(t - d_2) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} F_{i1}(t) \\ F_{i2}(t) \end{bmatrix}. \quad (14)$$

其中

$$G_i = T_i A_i T_i^{-1}, H_i = T_i B_i, \Gamma_{ij1} = T_i E_{ij} T_i^{-1}, F_i(t) = T_i g_i(t), N_i = T_i A_{id1} T_i^{-1}, M_i = T_i A_{id2} T_i^{-1}.$$

为进一步进行分析, 系统(14)可用如下方程表示:

$$\dot{z}_{i1}(t) = G_{i1} z_{i1}(t) + G_{i2} z_{i2}(t) + \sum_{j=1, j \neq i}^N \Gamma_{ij1} z_{j1}(t) + F_{i1}(t) + N_{i1} z_{i1}(t - d_1) + M_{i1} z_{i1}(t - d_2), \quad (15)$$

$$\dot{z}_{i2}(t) = G_{i3} z_{i1}(t) + G_{i4} z_{i2}(t) + H_{i2} u(t) + \sum_{j=1, j \neq i}^N \Gamma_{ij2} z_{j2}(t) + F_{i2}(t) + N_{i2} z_{i2}(t - d_1) + M_{i2} z_{i2}(t - d_2). \quad (16)$$

设计滑模面

$$s_i(t) = C_i x_i(t), C'_i = C_i T_i^{-1}, s_i(t) = C_i x_i(t) = C'_i z_i(t) = C'_{i1} z_{i1}(t) + C'_{i2} z_{i2}(t). \quad (17)$$

令  $C'_{i2} = 1$ , 由  $s_i(t) = 0$  可解出

$$z_{i2}(t) = -C'_{i1} z_{i1}(t). \quad (18)$$

将式(18)代入方程(15)中, 得到

$$\dot{z}_{i1}(t) = (G_{i1} - G_{i2} C'_{i1}) z_{i1}(t) + \sum_{j=1, j \neq i}^N \Gamma_{ij1} z_{j1}(t) + F_{i1}(t) + N_{i1} z_{i1}(t - d_1) + M_{i1} z_{i1}(t - d_2). \quad (19)$$

由系统性质可知, 当  $(A_i, B_i)$  可控时,  $(G_{i1}, G_{i2})$  可控, 通过极点配置选择适当的  $C'_{i1}$ , 使得系统滑动模态是有界稳定的。

**定理1** 如果假设1~假设4成立,则存在

$$\eta = \frac{(2h_i + 2\gamma + 2\alpha + 2\beta)\|P\|}{\lambda_{\min}(Q)},$$

使得对于所有的 $t$ 和 $z_{i1} \in B^c(\eta)$ ,不确定电力系统在滑模面 $s_i(t) = 0$ 上保持稳定状态.

**证明** 令 $G' = G_{i1} - G_{i2}C'_{i1}$ ,式(19)可以表示为

$$\begin{aligned} \dot{z}_{i1}(t) = & G'z_{i1}(t) + \sum_{j=1, j \neq i}^N \Gamma_{ij1}z_{j1}(t) + F_{i1}(t) + \\ & N_{i1}z_{i1}(t - d_1) + M_{i1}z_{i1}(t - d_2). \end{aligned} \quad (20)$$

构造李雅普诺夫函数

$$v(t) = z_{i1}^T(t)Pz_{i1}(t).$$

其中: $P$ 为李雅普诺夫方程 $G'^T P + P G' = -Q$ 的解, $Q$ 为给定的正定对称矩阵.

对 $v(t)$ 求导并将方程(20)代入,得到

$$\begin{aligned} \dot{v}(t) = & z_{i1}^T(t)(G'^T P + P G')z_{i1}(t) + \\ & F_{i1}^T(t)Pz_{i1}(t) + z_{i1}^T(t)PF_{i1}(t) + \\ & \left( \sum_{j=1, j \neq i}^N \Gamma_{ij1}z_{j1}(t) \right)^T Pz_{i1}(t) + \\ & z_{i1}^T(t)P \left( \sum_{j=1, j \neq i}^N \Gamma_{ij1}z_{j1}(t) \right) + \\ & [N_{i1}z_{i1}(t - d_1)]^T Pz_{i1}(t) + z_{i1}^T(t)P[N_{i1}z_{i1}(t - d_1)] + \\ & [M_{i1}z_{i1}(t - d_2)]^T Pz_{i1}(t) + \\ & z_{i1}^T(t)P[M_{i1}z_{i1}(t - d_2)] = \\ & - z_{i1}^T(t)Qz_{i1}(t) + F_{i1}^T(t)Pz_{i1}(t) + z_{i1}^T(t)PF_{i1}(t) + \\ & \left( \sum_{j=1, j \neq i}^N \Gamma_{ij1}z_{j1}(t) \right)^T Pz_{i1}(t) + \\ & z_{i1}^T(t)P \left( \sum_{j=1, j \neq i}^N \Gamma_{ij1}z_{j1}(t) \right) + \\ & [N_{i1}z_{i1}(t - d_1)]^T Pz_{i1}(t) + z_{i1}^T(t)P[N_{i1}z_{i1}(t - d_1)] + \\ & [M_{i1}z_{i1}(t - d_2)]^T Pz_{i1}(t) + z_{i1}^T(t)P[M_{i1}z_{i1}(t - d_2)]. \end{aligned} \quad (21)$$

由假设3和假设4可得

$$\begin{aligned} \dot{v}(t) \leq & -\lambda_{\min}(Q)\|z_{i1}\|^2 + 2h_i\|P\|\|z_{i1}\| + \\ & 2\gamma\|P\|\|z_{i1}\| + 2\alpha\|P\|\|z_{i1}\| + 2\beta\|P\|\|Z_{i1}\|. \end{aligned} \quad (22)$$

因为特征值 $\lambda_{\min}(Q) > 0$ ,在任何时刻当 $z_{i1} \in B^c(\eta)$ 时,李雅普诺夫函数 $\dot{v}(t) < 0$ ,系统是稳定的,

其中 $B^c(\eta)$ 是以 $z_{i1} = 0$ 为球心 $\eta$ 为半径的封闭球面 $B(\eta)$ 的补.

### 2.2.2 滑模控制器设计

不等式到达条件只能保证系统的运动轨迹从状态空间任意位置在有限时间内到达切换面,而对到达阶段的运动轨迹未作限制,趋近律方法可以改善到达阶段的动态品质.在电力系统负荷频率控制中,等速趋近律的控制方法容易实现,所以本文采用以下等速趋近律设计滑模控制器:

$$\dot{s}_i(t) = -\varepsilon \text{sgn}s_i(t), \quad \varepsilon > 0. \quad (23)$$

其中:常数 $\varepsilon$ 为系统的运动点趋近切换面 $s_i(t) = 0$ 的速率, $\text{sgn}^*$ 为符号函数.

**定理2** 当系统满足假设3和假设4时,设计的滑模控制器满足如下方程时:

$$\begin{aligned} u_i(t) = & - (C_i B_i)^{-1} \left\{ C_i A_i x_i(t) + C_i A_{id1} x_i(t - d_1) + \right. \\ & C_i A_{id2} x_i(t - d_2) + C_i \sum_{j=1, j \neq i}^N E_{ij} x_j(t) + C_i h_i + \\ & \left. \varepsilon \text{sgn} s_i(t) \right\}, \end{aligned} \quad (24)$$

系统满足到达条件.

**证明** 由式(17)和(23),得

$$\begin{aligned} \dot{s}_i(t) = C_i \dot{x}_i(t) = & C_i A_i x_i(t) + C_i B_i u_i(t) + C_i A_{id1} x_i(t - d_1) + \\ & C_i A_{id2} x_i(t - d_2) + C_i \sum_{j=1, j \neq i}^N E_{ij} x_j(t) + C_i g_i(t) = \\ & -\varepsilon \text{sgn} s_i(t). \end{aligned} \quad (25)$$

由式(25)可知,系统满足到达条件 $s_i \dot{s}_i < 0$ ,所以设计的控制器使系统的运动轨迹保持在滑动模式附近.

## 3 算例分析

为验证本文所提出控制策略的有效性和滑模负荷频率控制器的鲁棒性,通过以下两个仿真算例进行

表1 电力系统模型参数取值

区域	$T_{pi}$	$K_{pi}$	$T_{chi}$	$T_{gi}$	$R_i$
1	10	1	0.3	0.2	0.05
2	10	1	0.3	0.18	0.05
3	10	1	0.35	0.21	0.05
区域	$K_{Ei}$	$B_i$	$T_{ij}$	$T_{ESi}$	$K_b$
1	10	0.4	0.5	0.12	6
2	9	0.37	0.5	0.2	5
3	8	0.4	0.5	0.12	6

研究. 系统模型参数取值如表1所示, 并设系统基准功率为1 000 MW.

### 3.1 算例1

标称参数下, 在互联系统中加入随机负荷扰动和风机输出功率, 仿真结果如图2和图3所示.

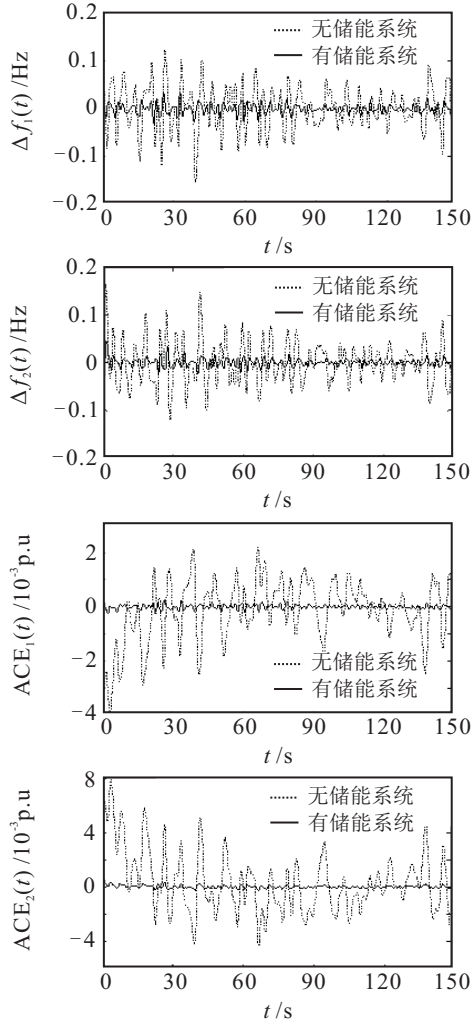


图2 对比有无储能系统的仿真结果

对不配置储能系统的滑模负荷频率控制方案与配置储能系统的滑模负荷频率控制方案的仿真比较结果如图2所示. 结果显示, 当只有滑模负荷频率控制器作用时, 两个区域的最大频率偏差达到0.15 Hz, 区域1的最大区域控制偏差达到4 MW(0.04 p.u.), 区域2达到8 MW(0.008 p.u.). 而在储能和滑模负荷频率控制器协调作用下, 两个区域的最大频率偏差和区域控制偏差仅为0.05 Hz和0.2 MW.

对配置储能系统的传统PI负荷频率控制方案与配置储能系统的滑模负荷频率控制方案的仿真比较结果如图3所示. 在传统PI控制下, 两个区域的最大频率偏差达到0.2 Hz, 而滑模控制下仅为0.05 Hz. 两个区域的最大区域控制偏差在传统PI控制下为1.5 MW, 而滑模控制下为0.2 MW. 此外, 图3还给出

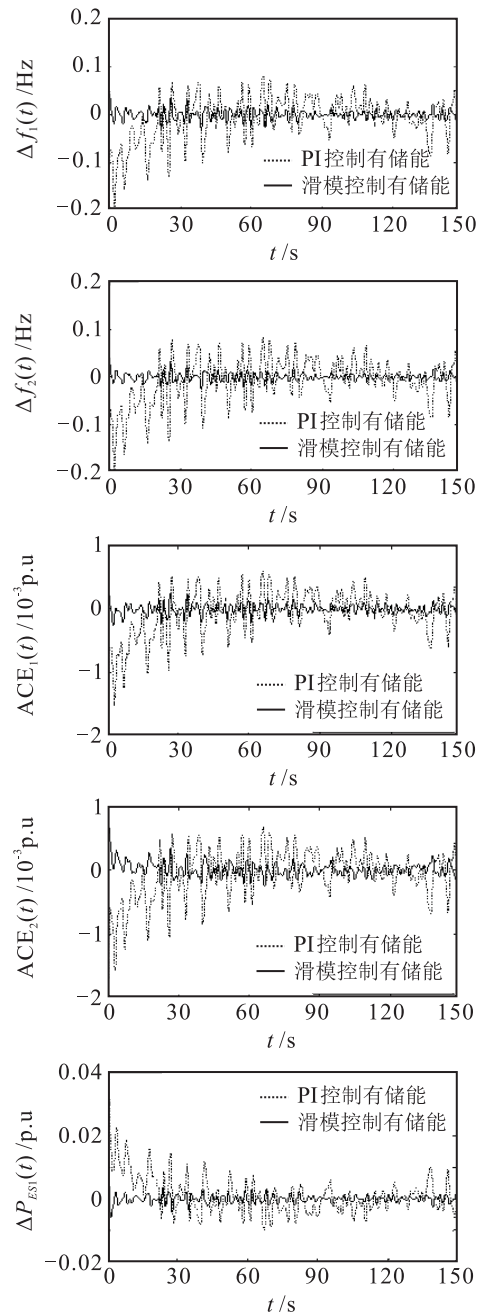


图3 不同控制方式下的仿真结果

了区域1中储能系统在这两种控制方式下的动作深度, PI控制下储能系统的动作深度是滑模控制下的5倍. 当配置相同类型的储能装置时, 传统PI控制下储能系统的动作深度较大, 需要配置较大容量的储能装置.

由以上仿真分析可知, 储能与滑模负荷频率控制器协调作用可有效减小系统频率偏差和区域控制偏差, 减少储能系统的投资, 提高电力系统安全稳定运行的经济性.

### 3.2 算例2

本文考虑了互联系统参数不确定性与储能系统和传统机组控制信道延时问题. 以下仿真结果表明, 滑模负荷频率控制器可提高系统的鲁棒性. 电力系

统模型的线性化和运行条件的变化导致系统参数不确定,系统参数变化范围如下所示:

$$T_{pi} \in [7.69 \ 14.286], K_{pi} \in [0.5 \ 1.5],$$

$$T_{g1} \in [0.154 \ 0.286], T_{g2} \in [0.138 \ 0.257],$$

$$T_{g3} \in [0.162 \ 0.3], T_{ch1} \in [0.2 \ 0.428],$$

$$T_{ch2} \in [0.2 \ 0.47], T_{ch3} \in [0.233 \ 0.5],$$

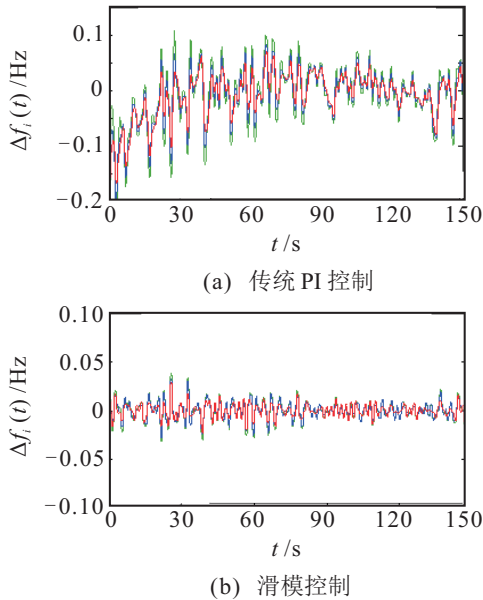


图 4 不同参数下仿真结果

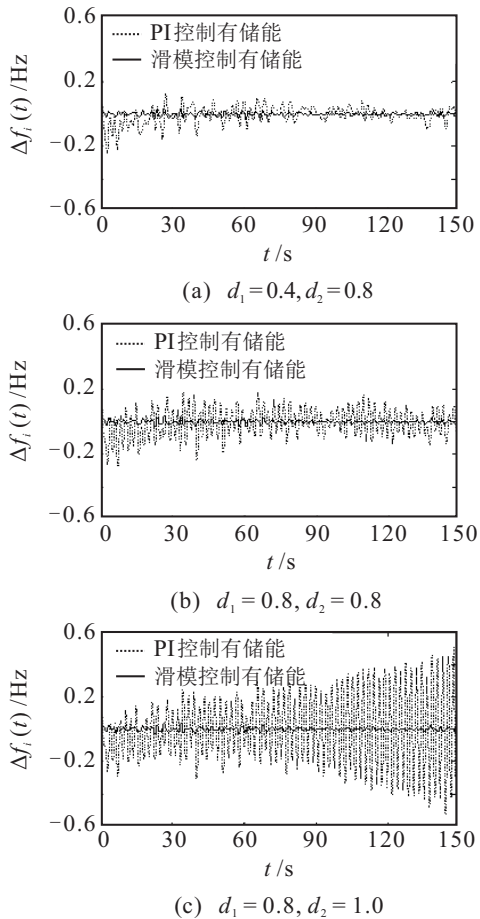


图 5 不同时滞下的仿真结果

图4(a)为传统PI控制下不同参数的仿真结果,图4(b)为滑模控制下的仿真结果. 无论系统参数取下界值还是上界值,在滑模控制下,系统频率偏差变化较小,始终保持在 $\pm 0.05$  Hz 范围内,而PI控制下,频率偏差的波动比滑模控制下大. 因此,本文设计的滑模负荷频率控制器对系统参数不确定性具有不敏感性,系统超调量较小,有效提高了系统的稳定性.

不同时滞下的仿真结果如图5所示. 由图5可见,PI控制下随着储能系统和传统发电机组通信延迟时间的增大,系统频率偏差的幅值增大,波动的剧烈程度也随之增加,而滑模控制下,可将频率偏差在很短的时间内维持在较小的范围. 储能系统和传统机组的控制信道延时问题加剧了负荷频率控制的难度. 由此可见,滑模负荷频率控制器对系统延迟问题具有不敏感性,有效提高了系统的鲁棒性.

### 4 结 论

本文针对含风储的多域时滞互联电力系统,提出了一种滑模负荷频率控制器与储能协调优化系统负荷频率的控制策略. 两个仿真案例结果表明:

1) 随着系统负荷波动和风能渗透率的增大,单一的调频手段已不能满足电力系统稳定运行的可靠性和经济性. 本文提出的协调控制策略不仅改善了电力系统调频的动态性能,提高了电能质量,而且减小了储能系统的配置容量,降低了对电力系统稳定运行的投资.

2) 针对含风储的多域互联电力系统LFC模型设计的滑模负荷频率控制器对系统参数不确定性与储能系统和传统机组控制信道延时问题具有不敏感性,从而提高了电力系统负荷频率控制的精度,增强了系统的鲁棒性.

### 参考文献(References)

- [1] Dokopoulos P S, Saramourtsis A C, Bakirtzis A G. Prediction and evaluation of the performance of wind-diesel energy systems[J]. IEEE Trans on Energy Conversion, 1996, 11(2): 385-393.
- [2] 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, 29(34): 5080-5087.  
(Hu Z C, Xie X, Zhang F, et al. Research on automatic generation control strategy incorporating energy storage resources[J]. Proc of the CSEE, 2014, 29(34): 5080-5087.)
- [3] 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.)
- [4] 丁冬, 六宗歧, 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.)
- [5] 倪琳娜, 罗吉, 王少荣, 等. 含风电电力系统的频率控制[J]. 电工技术学报, 2011, 26(1): 235-241.  
(Ni L N, Luo J, Wang S R, et al. Frequency control of power system with wind power integration[J]. Trans of China Electro Technical Society, 2011, 26(1): 235-241.)
- [6] Yousef H A, AL-Kharusi K, Albadi M H, et al. Load frequency control of a multi-area power system: an adaptive fuzzy logic approach[J]. IEEE Trans on Power System, 2014, 29(4): 1822-1830.
- [7] Kuljaca O, Gadewadikar J, Selmic R R. Adaptive neural network frequency control for thermo power generators power system[J]. Int J of Robotics and Automatic, 2011, 26(1): 86-92.
- [8] Muyeen S M, Hasanien H M, Tamura J. Reduction of frequency fluctuation for wind farm connected power systems by an adaptive artificial neural network controlled energy capacitor system[J]. IET Renewable on Power Generation, 2012, 6(4): 226-235.
- [9] 米阳, 马超, 符杨, 等. 基于滑模观测器的孤岛风柴混合电力系统SVC滑模补偿控制器设计[J]. 电网技术, 2017, 41(1): 178-186.  
(Mi Y, Ma C, Fu Y, et al. The design of sliding mode compensation controller in isolated wind-diesel hybrid power system based on sliding mode observer[J]. Power System Technology, 2017, 41(1): 178-186.)
- [10] Mi Y, Fu Y, Li D D, et al. The sliding mode load frequency control for hybrid power system based on disturbance observe[J]. Int J of Electrical Power and Energy System, 2016, 74: 446-452.
- [11] Mi Y, Fu Y, Wang C S, et al. Decentralized sliding mode load frequency control for multi-area power systems[J]. IEEE Trans on Power System, 2013, 28(4): 885-895.
- [12] Lu C F, Liu C C, Wu C J. Dynamic modeling of battery energy storage system and application to power system stability[J]. IEEE Proc Generation Transmission and Distribution, 1995, 142(4): 429-435.
- [13] 陆秋瑜, 胡伟, 郑乐, 等. 多时间尺度的电池储能系统建模与分析应用[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(16): 86-93.  
(Lu Q Y, Hu W, Zheng L, et al. Modeling and analysis of battery energy storage systems in multi-time scales application[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(16): 86-93.)
- [14] 黄际元, 李欣然, 曹一家, 等. 考虑储能参与快速调频动作时机与深度的容量配置方法[J]. 电工技术学报, 2015, 30(12): 454-464.  
(Huang J Y, Li X R, Cao Y J, et al. Capacity allocation of energy storage system considering its action moment and output depth in rapid frequency regulation[J]. Trans of China Electro Technical Society, 2015, 30(12): 454-464.)
- [15] Senjyu T, Sakamoto R, Urasaki N, et al. Output power leveling of wind turbine generator for all operating regions by pitch angle control[J]. IEEE Trans on Energy Conversion, 2006, 21(2): 467-475.
- [16] 蔡旭, 李征. 风电机组与风电场的动态建模[M]. 北京: 科学出版社, 2016: 86-127.  
(Cai X, Li Z. Dynamic modeling of wind turbine and wind farms[M]. Beijing: Science Press, 2016: 86-127.)
- [17] Yan X G, Spurgeon S K, Edwards C. Global decentralised static output feedback sliding mode control for interconnected time-delay system[J]. IET Control Theory Application, 2012, 6(2): 192-202.
- [18] 米阳, 潘达, 吴晓, 等. 基于等速趋近律的滑模负荷频率控制设计[J]. 控制工程, 2014, 21(3): 326-329.  
(Mi Y, Pan D, Wu X, et al. The Research of sliding model load frequency control strategy based on constant reaching law[J]. Control Engineering of China, 2014, 21(3): 326-329.)
- [19] 高为炳. 变结构控制的理论及设计方法[M]. 北京: 科学出版社, 1998: 90-149.  
(Gao W B. The theory and design method of variable structure control[M]. Beijing: Science Press, 1998: 90-149.)

(责任编辑: 郑晓蕾)