

doi: 10.7690/bgzdh.2020.03.011

基于观测器的智能微电网分布式云储能系统 H-infinite 控制方法

李磊¹, 周振华¹, 王茂²

(1. 常州工业职业技术学院智能控制学院, 江苏 常州 213164;

2. 哈尔滨工业大学空间控制与惯性技术研究中心, 哈尔滨 150000)

摘要: 为解决目前智能微电网分布式云储能系统运行架设成本较高且难寻有效整体控制规律的问题, 引入一种基于观测器的 H_∞ 控制器设计方法。在分段仿射 Lyapunov 函数的基础上, 应用投影定理以及几个基本引理, 寻求基于观测器且满足鲁棒 H_∞ 性能指标的反馈控制器设计方法, 获得闭环控制系统的反馈控制器增益和观测器增益, 并将云储能供电系统与传统电力系统进行比较。结果表明: 采用该控制方法构建的电网使得新型能源的利用率更高, 同时传统常规电力系统耗能有所下降。

关键词: 智能微电网; 分布式云储能系统; 观测器; H_∞ 控制; LMIs

中图分类号: TP332 **文献标志码:** A

Observer-based H-infinite Control for Distributed Cloud Energy Storage System in Smart Micro Grid

Li Lei¹, Zhou Zhenhua¹, Wang Mao²

(1. College of Intelligence Control, Changzhou Vocational Institute of Engineering, Changzhou 213164, China;

2. Research Institute of Space Control & Inertia Technology, Harbin Institute of Technology, Harbin 150000, China)

Abstract: In order to solve the problem that the cost of operation and erection of distributed cloud energy storage system in intelligent micro grid is high and it is difficult to find an effective overall control law, an observer-based controller design method is introduced. Based on segmentation affine Lyapunov function, use projection principle and several basic lemmas, and find out an approach of designing observer-based robust H_∞ feedback controller. Acquire close loop control system feedback controller gain and observer gain. Compare the cloud energy storage power supply system with the traditional power system. The system result shows that the new energy utilization ratio is higher and the traditional energy grid system power consumption is lower by using the observer-based h-infinite control method to establish energy grid.

Keywords: intelligent micro grid; distributed cloud energy storage system; observer; H_∞ control; LMIs

0 引言

伴随工业 4.0 时代的到来, 兼并信息化与资源整体化的能源电力行业技术也孕育而生, 相关通信技术和控制策略也得到发展: 能源互联网技术将为未来电力系统发展提供新的方向, 智能微电网云储能系统的出现为能源互联网提供了一种行之有效的解决方案^[1]。按照电源侧安装位置的不同, 笔者将智能微电网云储能系统分为分布式与集中式 2 种。笔者所提分布式储能方式通常将供电电源安装在用户侧或者微电网中^[2]。我国目前即将迎来经济高速稳定发展的历史时期, 分布式云储能系统将更加适合未来人们的需求^[3]。

目前, 基于微电网的运行和控制是国内外对于分布式储能系统的研究热点^[4-7], 与之匹配控制策略的选择也成为解决该类问题的核心, 而分散控制策

略^[8-10]和集中控制策略^[11-13]是目前 2 种典型的分布式储能运行决策方法。文献[7]指出云储能的实质是共享系统中的储能设备, 让系统具有更大的灵活性, 在此基础上描绘了分布式云储能系统的整体架构。文献[8]开始考虑多个基本储能单元之间的协调工作关系, 通过相邻单元彼此之间的迭代协调达到整个系统的最优控制策略。接下来, 一种多代理合作控制策略在文献[9]中被提出, 用以平衡直流微电网中基本分布式储能单元之间的瞬时功率。文献[10]针对低压配智能微电网中存在的电压跃升和跌落问题, 研究了分布式储能局部控制与单独控制的方法, 为该类系统工作在高光伏渗透率的应用环境中提供可能性。文献[11-12]分别利用分布式储能规划运行最优解和联合运行优化的方法, 对控制系统外部参数进行设置。在经济价值方面, 文献[13]给出智能微电网分布式电池储能系统在单位电价基础下的套

收稿日期: 2019-12-22; 修回日期: 2020-01-09

基金项目: 常州轻院院级博士基金项目

作者简介: 李磊(1998—), 男, 安徽人, 学士, 从事复杂大系统控制理论研究。E-mail: 191439371@qq.com。

利问题，将权衡经济价值和电池使用寿命问题综合考虑，最终得到基于最优控制理论的套利策略。在其他方面，文献[14-15]给出了电动汽车和能量信息化领域关于分布式储能系统的研究成果。综上所述，先前针对分布式储能系统所做研究均没有考虑外部扰动和系统自身某一独立单元掉电给整个系统带来的影响，也没有给出行之有效的整体控制规律。笔者考虑外部扰动存在的情况，引入观测器 H_∞ 控制器设计方法，解决了自身与外部不确定因素对系统的影响，并使构成的闭环控制系统渐进稳定。

1 总体设计

从分布式云储能系统中一个基本单元的数学建模出发，为寻求该类系统在充放电之间电压电流稳定工作时的平衡点，采用分段仿射静态输出反馈控制方法实现系统镇定，进而建立该类云储能系统在充放电之间的安全机制。在此基础上，应用分段仿射系统鲁棒 H_∞ 控制方法给出分布式云储能系统稳定的充分必要条件。基于文献[7]，笔者考虑智能微电网分布式云储能系统整体架构如图 1 所示。

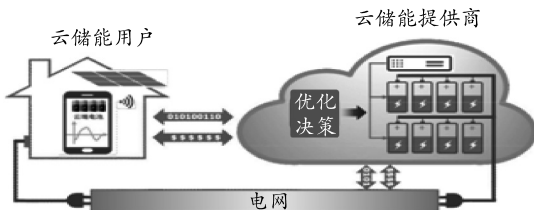


图 1 智能微电网分布式云储能系统整体架构

2 数学建模

笔者所考虑智能微电网分布式云储能系统中的基本储能单元充放电过程模型如图 2 所示。当基本单元中能量在 J_0 位置时，该系统充放电达到平衡，此时电压、电流变化率趋近于零，充电、放电电量差值变化在此刻也趋近于零。控制目的在于稳定围绕能量平衡点 J_0 处波动的工作状态，在反复波动的充放电过程中，使得充放电电压、充放电电流以及充放电电量差值变化作为系统状态的闭环系统渐进稳定。

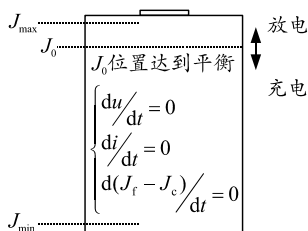


图 2 基本储能单元稳定工作状态

平衡点 J_0 处的系统稳定是相对于系统中子系统突然掉电失灵以及外部干扰对于整个系统的影响而言，即当系统因外力以及自身原因导致充放电过程波动很大甚至无法工作时，应用笔者所提基于观测器 H_∞ 控制策略能使分布式储能系统重新返回初始位置(平衡点)。其中，取基本储能单元放电电压 U_f 为系统的输入变量，并采用一个可控阀门对输入变量进行调节，基本单元放电 U_c 电压通常取一个既定常数。 I_c 和 I_f 代表平衡点处储能单元充放电时流经电网的电流， J_{max} 和 J_{min} 用来表示整个过程中基本储能单元能量的最大值和最小值。

相对于整体的控制目标以及控制效果，牺牲充放电过程，反复调整的时间以及调整过程中的损耗是可取的。控制目的在于节省维修人力以及实现全网智能化的控制理念。基本储能单元模型作为分段仿射系统理论最典型的应用，即在广义矩阵 $E=I$ 情况下描述的一般形式的控制系统。在文中，解决此类分段仿射控制系统具体问题的途径是通过寻求系统各变量之间的关系式，采用变量替换的方法构造形式上的广义系统，最后应用文中主要结果对所提广义分段仿射系统控制问题进行分析处理。

伴随采样时刻 T 的不断迭代，将图 1 所示云储能基本单元系统按照平衡点 J_0 进行分类，具体表示为 2 个子系统 ($J > J_0$ 对应 X_1 , $J \leq J_0$ 对应 X_2) 的 PWA 模型：

$$\left. \begin{aligned} x(k+1) &= x(k) + \frac{TU_c}{I_{c1}}u(k) - \frac{dU_f}{dt} \frac{TU_f}{I_{f1}}, \\ x(k) &\in X_1 \\ x(k+1) &= x(k) + \frac{TU_c}{I_{c2}}u(k) - \frac{dU_f}{dt} \frac{TU_f}{I_{f2}}, \\ x(k) &\in X_2 \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

针对图 1 所示基本储能单元模型，考虑控制系统存在随机扰动的情况，且扰动 $w(k)$ 的形式为随时间不断衰减的噪声信号。另一方面，考虑系统存在范数有界形式的不确定性，则此类储能单元模型可以归纳为如下具有范数有界参数不确定性的离散时间广义分段仿射系统：

$$\left. \begin{aligned} Ex(k+1) &= (A_i + \Delta A_i)x(k) + B_i u(k) + D_{i1}w(k) + E(b_i + \Delta b_i), \\ y(k) &= C_i x(k), y(k) \in \mathcal{R}_i, i \in I \\ z(k) &= G_i x(k) + D_{i2}w(k), \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

其中： $x(k) \in R^n_x$ 为系统状态变量； $u(k) \in R^n_u$ 为控制输入向量； $y(k) \in R^n_y$ 为系统输出向量； $z(k) \in R^n_z$ 为

可控输出向量; $w(k) \in R^n$ 且 $w(k) \in l_2[0, \infty)$ 为扰动输入; $A_i, B_i, C_i, D_{i1}, G_i, D_{i2}, b_i, E$ 为第 i 个子系统的已知定常系数矩阵; Eb_i 是偏置项; 索引集合是 $I = \{1, 2, \dots, N\}$; $E \in R^{n \times n}$ 是广义矩阵, 且 $\text{rank}(E) = r \leq n$; ΔA_i 和 Δb_i 代表系统的不确定项, 且满足如下形式:

$$[\Delta A_i E \Delta b_i] = W_{i1} \Delta_i(t) [E_{i1} E_{i2}], \quad i \in I. \quad (3)$$

其中: W_{i1} , E_{i1} 和 E_{i2} 是具有适当维数的已知实定常矩阵, $\Delta_i(t): Z^+ \rightarrow R^{s_1 \times s_2}$ 是一个包含 Lebesgue 可测量元素的未知实值时变矩阵函数, 具有如下形式:

$$\Delta_i^T(t) \Delta_i(t) \leq I_{s_2}. \quad (4)$$

如果式(2)和式(3)成立, 则称系统的参数不确定性是容许的。

令 Ω 代表子系统从多面体区域 \mathcal{R}_i 过渡到 \mathcal{R}_j 的集合, 可以描述为:

$$\Omega = \{(i, j) | y(k) \in \mathcal{R}_i, y(k+1) \in \mathcal{R}_j, i, j \in I\}. \quad (5)$$

假设多面体区域 $\mathcal{R}_i, i \in I$ 具有形式:

$$\mathcal{R}_i = \{y | \alpha_i \leq y \leq \beta_i, y = C_i x\}, \quad i \in I. \quad (6)$$

该多面体区域可以进一步描述为一个椭圆集合, 其中 $F_i = 2C_i / (\beta_i - \alpha_i)$, $f_i = -(\beta_i + \alpha_i) / (\beta_i - \alpha_i)$;

$$\varepsilon_i = \{x | \|F_i x + f_i\| \leq 1\}, \quad i \in I. \quad (7)$$

对于每个椭圆区域, 可以得到:

$$\begin{bmatrix} x(k) \\ 1 \end{bmatrix}^T \begin{bmatrix} F_i^T F_i & F_i^T f_i \\ * & f_i^T f_i - 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x(k) \\ 1 \end{bmatrix} \leq 0, \quad i \in I. \quad (8)$$

进一步将状态空间分为 2 类区域, $I = I_0 \cup I_1$, I_0 代表包含原点的 $f_i^T f_i - 1 \leq 0$ 索引集合区域, I_1 代表其余的索引集合区域。

根据定义式(7), 可以将上述 2 个子系统的作用域变换到椭圆集 X_i 的形式, 其中:

$$X_i = \{x | \|E_i x + e_i\| \leq 1\}, \quad i = 1, 2, E_1 = 2 / (J_{\max} - J_0), E_2 = 2 / (J_0 - J_{\min}), e_1 = -(J_{\max} + J_0) / (J_{\max} - J_0), e_2 = (J_0 + J_{\min}) / (J_0 - J_{\min}).$$

3 预备知识

定义 1^[16] 考虑离散时间广义分段仿射系统(1), 其中 $u(k) = 0$ 。

1) 如果存在 $z \in C$ 使得 $\det(zE - A_i) \neq 0$, 则称广义系统(1)是正则的, $i \in I$ 。

2) 如果 $\deg(\det(zE - A_i)) = \text{rank}(E), i \in I$ 则称广义系统(1)是因果的。

3) 如果离散广义系统(1)的所有特征根 $\lambda(E, A_i) \in D_{\text{int}}(0, 1)$, 则称系统(1)稳定。

4) 如果系统(1)是正则、因果, 而且渐进稳定, 则广义系统(1)必然是容许的。

5) 任意非零向量 v^1 , 若满足 $E v^1 = 0$, 则称其为矩阵束 (E, A_i) 的 1 阶向量, 对于满足 $E v^k = A_i v^{k-1}$ 的非零特征向量 $v^k (k \geq 2)$, 则称为矩阵束 (E, A_i) 的 k 阶特征向量。

引理 1 对于适当维数实矩阵 $M = M^T$ 、 S 、 N 和 $\Delta(t)$, 若满足 $\Delta^T(t) \Delta(t) \leq I$, 则当且仅当存在某个标量 $\varepsilon > 0$ 时: $M + S \Delta(t) N + N^T \Delta^T(t) S^T < 0$ 等价于 $M + \varepsilon S S^T + \varepsilon^{-1} N^T N < 0$ 。

引理 2^[17] (投影定理) 给定矩阵 $h = h^T \in R^{n \times n}$, $u \in R^{k \times n}$ 和 $v \in R^{m \times n}$, 则关于变量 Δ 的矩阵不等式 $h + u^T \Delta^T v + v^T \Delta u < 0$ 是 LMI 可解的, 当且仅当:

$$\textcircled{1} \text{ 若 } v_{\perp} = 0, u_{\perp} \neq 0, \text{ 则 } u_{\perp}^T h u_{\perp} < 0;$$

$$\textcircled{2} \text{ 若 } u_{\perp} = 0, v_{\perp} \neq 0, \text{ 则 } v_{\perp}^T h v_{\perp} < 0;$$

$$\textcircled{3} \text{ 若 } u_{\perp} \neq 0, v_{\perp} \neq 0, \text{ 则 } u_{\perp}^T h u_{\perp} < 0, v_{\perp}^T h v_{\perp} < 0。$$

同时成立, u_{\perp} 、 v_{\perp} 代表 u 和 v 的右正交核空间。

引理 3^[17] 若 $\psi_0(\xi), \psi_1(\xi), \dots, \psi_p(\xi)$ 为 $\xi \in R^n$ 的二次仿射函数, 其中 $\psi_i(\xi) = \xi^T Q_i \xi, i = 0, 1, \dots, p$, 且 $Q_i = Q_i^T$ 。对于一组正数 $\mu_1, \mu_2, \dots, \mu_p > 0$, 则 $\psi_0(\xi) \leq 0, \psi_1(\xi) \leq 0, \dots, \psi_p(\xi) \leq 0 \Rightarrow \psi_0(\xi) \leq 0$ 成立, 即 $Q_0 - \sum_{i=1}^p \mu_i Q_i \leq 0$ 。

文中考虑如下基于观测器的控制器:

$$\left. \begin{aligned} \hat{x}(k+1) &= A_i \hat{x}(k) + B_i u(k) + E(b_i + \Delta b_i) + \\ &\quad L_i(\hat{y}(k) - E y(k)), \\ \hat{y}(k) &= C_i \hat{x}(k), \quad y(k) \in \mathcal{R}_i, \quad i \in I, \\ u(k) &= K_i \hat{x}(k). \end{aligned} \right\}. \quad (9)$$

其中: $\hat{x}(k) \in R^n$ 为 $x(k)$ 的跟踪值; $\hat{y}(k)$ 为闭环系统的输出; K_i, L_i 分别为欲寻求的反馈控制器增益矩阵和闭环控制系统观测器增益矩阵。定义 $\tilde{x}(k) = [x^T(k) \quad e^T(k)]$, 并定义估计误差 $e(k) = \hat{x}(k) - E x(k)$, 联合式(1)和式(8)在满足条件 $C_i = E^T C_i E$ 时, 可得由此控制器构成的闭环系统描述:

$$\left. \begin{aligned} \overline{E} \tilde{x}(k+1) &= \overline{A}_i \tilde{x}(k) + \overline{D}_{i1} w(k) + \overline{b}_i, \\ \tilde{z}(k) &= \overline{G}_i \tilde{x}(k) + D_{i2} w(k), \end{aligned} \right\}. \quad (10)$$

$$\text{其中: } \overline{A}_i = \begin{bmatrix} A_i + \Delta A_i + B_i K_i E & B_i K_i \\ A_i E - (A_i + \Delta A_i) & A_i + L_i C_i \end{bmatrix}, \quad \overline{E} = \begin{bmatrix} E & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix},$$

$$\overline{G}_i = [G_i \quad 0], \quad \overline{D}_{i1} = \begin{bmatrix} D_{i1} \\ -D_{i1} \end{bmatrix}, \quad \overline{b}_i = \begin{bmatrix} E(b_i + \Delta b_i) \\ 0 \end{bmatrix}, \text{ 则文}$$

中所考虑基于观测器的 H_∞ 控制器设计问题是要求设计控制器(8), 使得闭环系统(9)是容许的。

4 主要结果

假设系统(1)的输入矩阵 $B_i, i \in I$ 是列满秩的, 则存在一组转换矩阵, $T_{B_i} \in \mathbf{R}^{n_x \times n_x}, i \in I$ 满足:

$$T_{B_i} B_i = \begin{bmatrix} I_{n_u} \\ 0_{(n_x - n_u) \times n_u} \end{bmatrix}, \quad i \in I. \quad (11)$$

其中, $T_{B_i} \in \mathbf{R}^{n_x \times n_x}$ 是非奇异。该假设用以推导以下基于观测器的 H_∞ 控制器设计问题的基本定理。

定理 考虑范数有界时变参数广义分段仿射系统(1), 若存在对称矩阵 $H_1, H_3 \in \mathbf{R}^{n_x \times n_x}$ 标量 $\{\lambda_{ij} < 0, i \in I_1, (i, j) \in \Omega\}$, $K_i \in \mathbf{R}^{n_u \times n_x}$, $L_i \in \mathbf{R}^{n_y \times n_x}$, $\gamma \in \mathbf{R}$, $\{\varepsilon_{ij}, \varepsilon'_{ij}, i \in I, (i, j) \in \Omega\}$, 使得:

$$\overline{E}^T P_i \overline{E} \geq 0; \quad (12)$$

$$\begin{bmatrix} -\gamma^2 I & 0 & 0 & D_{i2} & G_i & 0 & 0 & 0 & 0 \\ * & H_1 & H_2 & D_{i1} & \tilde{A}_i & B_i K_i & E b_i & W_{i1} & 0 \\ * & * & H_3 & -D_{i1} & \varpi & A_i + L_i C_i & 0 & 0 & W_{i1} \\ * & * & * & -I & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ * & * & * & * & \pi & J_2 & \theta & 0 & 0 \\ * & * & * & * & * & J_3 & I_2 & 0 & 0 \\ * & * & * & * & * & * & \tau & 0 & 0 \\ * & * & * & * & * & * & * & -\varepsilon_{ij} I_{s1} & 0 \\ * & * & * & * & * & * & * & * & \varepsilon'_{ij} I_{s1} \end{bmatrix} < 0, \quad (13)$$

$i \in I_1, (i, j) \in \Omega$.

$$X = \begin{bmatrix} \overline{D}_{i1}^T P_j \overline{D}_{i1} - I + \gamma^{-2} \overline{D}_{i2}^T \overline{D}_{i2} - I & \overline{D}_{i1}^T P_j \overline{A}_i + \gamma^{-2} \overline{D}_{i2}^T \overline{G}_i & \overline{D}_{i1}^T P_j \overline{b}_i \\ * & \overline{A}_i^T P_j \overline{A}_i - \overline{E}^T P_i \overline{E} + \gamma^{-2} \overline{G}_i^T \overline{G}_i & \overline{A}_i^T P_j \overline{b}_i \\ * & * & \overline{b}_i^T P_j \overline{b}_i \end{bmatrix}.$$

从式(16), 可以得到:

$$\overline{A}_i^T P_j \overline{A}_i - \overline{E}^T P_i \overline{E} + \gamma^{-2} \overline{G}_i^T \overline{G}_i < 0. \quad (18)$$

即

$$\overline{A}_i^T P_j \overline{A}_i - \overline{E}^T P_i \overline{E} < 0. \quad (19)$$

此处, 假定 $(\overline{E}, \overline{A}_i)$ 矩阵束是非因果, 用 \mathbf{v}^1 和 \mathbf{v}^{1*} 分别左乘和右乘式(18)得:

$$\mathbf{v}^{1*} \overline{A}_i^T P_j \overline{A}_i \mathbf{v}^1 - \mathbf{v}^{1*} \overline{E}^T P_i \overline{E} \mathbf{v}^1 < 0. \quad (20)$$

其中: \mathbf{v}^1 是 1 阶特征向量; \mathbf{v}^{1*} 则是它的 Hermitian

成立, 则存在基于观测器的 H_∞ 控制器(8), 使得由此构成的闭环系统(9)是容许的, 且外部干扰 w 到跟踪误差传递函数的 H_∞ 范数小于预先指定的常数 γ 。

$$\begin{aligned} \overline{\varepsilon}_{ij} &= \varepsilon_{ij}^{-1}, \quad \tau = \lambda_{ij} (f_i^T f_i - 1) + \overline{\varepsilon}_{ij} E_{i2}^T E_{i2}, \quad \theta = I_1 + \\ &\overline{\varepsilon}_{ij} E_{i1}^T E_{i2}, \quad \overline{A}_i = A_i + B_i K_i E, \quad \pi = J_1 + \overline{\varepsilon}_{ij} E_{i1}^T E_{i1} - \\ &\overline{\varepsilon}'_{ij} E_{i1}^T E_{i1}, \quad \varpi = A_i E - A_i, \quad -P_j^{-1} = \begin{bmatrix} H_1 & H_2 \\ * & H_3 \end{bmatrix}, \quad \lambda_{ij} F_i^T f_i = \\ &\begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \end{bmatrix}, \quad -\overline{E}^T P_i \overline{E} + \lambda_{ij} F_i^T F = \begin{bmatrix} J_1 & J_2 \\ * & J_3 \end{bmatrix}. \end{aligned}$$

证明 首先, 基于闭环系统(9)的状态空间描述构造适当的分段仿射 Lyapunov 函数, 并加以处理。

选取广义分段仿射 Lyapunov 函数:

$$V(k, \tilde{x}(k+1)) = \tilde{x}^T(k) \overline{E}^T P_i \overline{E} \tilde{x}(k), \quad i \in I. \quad (14)$$

进一步构造 $\Delta V(k)$:

$$\Delta V(k) = V(k+1, \tilde{x}(k+1)) - V(k, \tilde{x}(k)). \quad (15)$$

基于 Lyapunov 函数的定义, 为使闭环系统(9)具有鲁棒 H_∞ 性能指标 γ , 只需保证以下不等式成立:

$$\begin{aligned} &V(k+1, \tilde{x}(k+1)) - V(k, \tilde{x}(k)) + \\ &\gamma^{-2} \tilde{z}^T(t) \tilde{z}(t) - w^T(t) w(t) < 0. \end{aligned} \quad (16)$$

此处基于闭环控制系统(9)的状态空间描述, 对于任意非零 $w(k) \in l_2[0, \infty)$, 式(15)可进一步展开:

$$[w(k)^T \quad \tilde{x}(k)^T \quad 1] X [w(k)^T \quad \tilde{x}(k)^T \quad 1]^T < 0. \quad (17)$$

其中

$$X = \begin{bmatrix} \overline{D}_{i1}^T P_j \overline{D}_{i1} - I + \gamma^{-2} \overline{D}_{i2}^T \overline{D}_{i2} - I & \overline{D}_{i1}^T P_j \overline{A}_i + \gamma^{-2} \overline{D}_{i2}^T \overline{G}_i & \overline{D}_{i1}^T P_j \overline{b}_i \\ * & \overline{A}_i^T P_j \overline{A}_i - \overline{E}^T P_i \overline{E} + \gamma^{-2} \overline{G}_i^T \overline{G}_i & \overline{A}_i^T P_j \overline{b}_i \\ * & * & \overline{b}_i^T P_j \overline{b}_i \end{bmatrix}.$$

矩阵。

根据定义 1, 再用 $\overline{E} \mathbf{v}^1$ 代替 $\overline{A}_i \mathbf{v}^1$, 并注意到 $\overline{E} \mathbf{v}^1 = 0$, 可以得到:

$$\mathbf{v}^{2*} \overline{E}^T P_i \overline{E} \mathbf{v}^2 < 0. \quad (21)$$

注意到式(21)与条件式(11)不一致。因此, 可以得到矩阵束 $(\overline{E}, \overline{A}_i)$ 的因果性。显然, 此处其正则性在证明矩阵束因果性的同时也得到了印证。

基于仿射区域定义, 即应用引理 3, 并将式(7)代入式(16), 其中 $\lambda_{ij} < 0, i \in I_1, (i, j) \in \Omega$, 得到:

$$\begin{bmatrix} w(k) \\ \tilde{x}(k) \\ 1 \end{bmatrix}^T \left\{ \begin{bmatrix} \overline{D_{i1}^T} \\ \overline{A_i^T} \\ \overline{b_i^T} \end{bmatrix} P_j(*) + \gamma^{-2} \begin{bmatrix} D_{i2}^T \\ \overline{G_i^T} \\ 0 \end{bmatrix} (*) + \begin{bmatrix} -I & 0 & 0 \\ * & -\overline{E^T} P_i \overline{E} + \lambda_{ij} F_i^T F_i & \lambda_{ij} F_i^T f_i \\ * & * & \lambda_{ij} (f_i^T f_i - 1) \end{bmatrix} \right\} \begin{bmatrix} w(k) \\ \tilde{x}(k) \\ 1 \end{bmatrix} < 0, (i, j) \in \Omega. \quad (22)$$

合并式(21)中各个相乘矩阵，在处理矩阵的基本引理基础上反复应用 2 次 Schur 补引理，从式(21)可以得到：

$$\begin{bmatrix} -\gamma^2 I & 0 & D_{i2} & \overline{G_i} & 0 \\ * & -P_j^{-1} & \overline{D_{i1}} & \overline{A_i} & \overline{b_i} \\ * & * & -I & 0 & 0 \\ * & * & * & -\overline{E^T} P_i \overline{E} + \lambda_{ij} F_i^T F_i & \lambda_{ij} F_i^T f_i \\ * & * & * & * & \lambda_{ij} (f_i^T f_i - 1) \end{bmatrix} < 0, \quad (i, j) \in \Omega. \quad (23)$$

此外，由于文中所涉及的广义分段仿射系统具有范数有界参数不确定性，为进一步将式(22)中的不确定性 ΔA_i 和 $E \Delta b_i$ 独立体现出来，可以将式(22)再次进行整理。

定义：

$$\begin{bmatrix} -\gamma^2 I & 0 & 0 & D_{i2} & G_i & 0 & 0 \\ * & H_1 & H_2 & D_{i1} & \tilde{A}_i & B_i K_i & E b_i \\ * & * & H_3 & -D_{i1} & A_i E - A_i & A_i + L_i C_i & 0 \\ * & * & * & -I & 0 & 0 & 0 \\ * & * & * & * & J_1 & J_2 & I_1 \\ * & * & * & * & * & J_3 & I_2 \\ * & * & * & * & * & * & \lambda_{ij} (f_i^T f_i - 1) \end{bmatrix} + sym \left\{ \begin{bmatrix} 0 \\ W_{i1} \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ E_{i1}^T \\ 0 \\ E_{i2}^T \end{bmatrix}^T \right\} - sym \left\{ \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ E_{i1}^T \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}^T \right\} < 0, (i, j) \in \Omega. \quad (25)$$

此处采用引理 1，基于维数相当的实数矩阵，在指定区域内引入一系列标量： $\overline{\varepsilon}_{ij} > 0, i \in I_1$ ， $\overline{\varepsilon}'_{ij} > 0, i \in I_1, (i, j) \in \Omega$ ，应用 schur 补引理的基础上，进一步抵消闭环控制系统自身的不确定性：

$$\begin{bmatrix} -\gamma^2 I & 0 & 0 & D_{i2} & G_i & 0 & 0 & 0 & 0 \\ * & H_1 & H_2 & D_{i1} & \tilde{A}_i & B_i K_i & E b_i & W_{i1} & 0 \\ * & * & H_3 & -D_{i1} & \varpi & A_i + L_i C_i & 0 & 0 & W_{i1} \\ * & * & * & -I & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ * & * & * & * & \pi & J_2 & \theta & 0 & 0 \\ * & * & * & * & * & J_3 & I_2 & 0 & 0 \\ * & * & * & * & * & * & \tau & 0 & 0 \\ * & * & * & * & * & * & * & -\varepsilon_{ij} I_{s1} & 0 \\ * & * & * & * & * & * & * & * & \varepsilon'_{ij} I_{s1} \end{bmatrix} < 0, \quad i \in I_1, (i, j) \in \Omega. \quad (26)$$

定理得证。

$$-P_j^{-1} = \begin{bmatrix} H_1 & H_2 \\ * & H_3 \end{bmatrix}, \quad \lambda_{ij} F_i^T f_i = \begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \end{bmatrix}, \quad -\overline{E^T} P_i \overline{E} +$$

$$\lambda_{ij} F_i^T F_i = \begin{bmatrix} J_1 & J_2 \\ * & J_3 \end{bmatrix},$$

$$\begin{bmatrix} -\gamma^2 I & 0 & 0 & D_{i2} & G_i & 0 & 0 \\ * & H_1 & H_2 & D_{i1} & \tilde{A}_i + \Delta A_i & B_i K_i & E(b_i + \Delta b_i) \\ * & * & H_3 & -D_{i1} & \sigma & A_i + L_i C_i & 0 \\ * & * & * & -I & 0 & 0 & 0 \\ * & * & * & * & J_1 & J_2 & I_1 \\ * & * & * & * & * & J_3 & I_2 \\ * & * & * & * & * & * & \lambda_{ij} (f_i^T f_i - 1) \end{bmatrix} < 0, \quad (i, j) \in \Omega. \quad (24)$$

其中 $\sigma = A_i E - A_i - \Delta A_i$ 。

进一步得到：

$$\begin{bmatrix} 0 \\ W_{i1} \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ E_{i1}^T \\ 0 \\ E_{i2}^T \end{bmatrix}^T - \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ E_{i1}^T \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}^T < 0, (i, j) \in \Omega. \quad (25)$$

5 数值仿真

首先，通过对整体系统描述中系统矩阵进行赋值，验证笔者所提方法的有效性，并最终得到观测器增益以及反馈控制增益。最后，通过 2 种供电模式能耗比例的对比，证实文中方法的卓越性。

文中“安全稳定控制”中的“安全”是指，针对分布式云储能系统某一储能单元突然掉电或失灵的情况，采取基于广义系统的整体控制策略，解决整体系统由于某一子系统出现故障而突发危险的问题。所谓“稳定”是针对分布式云储能系统稳定工作时，如何抵消外部扰动对整体系统造成影响而言的，采取基于广义分段仿射系统的整体控制策略，使得整体系统在因外部扰动工作状态发生改变后，能够自适应调节重新回到原始平衡点稳定状态中。因此，考虑由 2 个基本储能单元构成的分布式云储能系统，令 $x_1(k)$ 代表放电电压变化率， $x_2(k)$ 代表

充电电流变化率, $x_3(k)$ 代表放电电流变化率。将扰动输入取为白噪声信号, 且随时间延续不断衰减, 则离散化得到系统模型:

$$\begin{cases} Ex(k+1) = (A_i + \Delta A_i)x(k) + B_i u(k) + D_{i1}w(k) + E(b_i + \Delta b_i) \\ y(k) = C_i x(k), i=1,2, \end{cases}$$

其中系统状态 $x(0) = (2.5, 1, -1)$, 其他系统矩阵参数取值如下:

$$\begin{aligned} A_1 &= \begin{bmatrix} 0.1 & 0.2 & 0.4 \\ 0.2 & 0.6 & 0 \\ 1 & 2 & 0.2 \end{bmatrix}, & A_2 &= \begin{bmatrix} 0.2 & 0.3 & 0.1 \\ 1 & 0.5 & 0.6 \\ 1 & 0.5 & 0.8 \end{bmatrix}, \\ B_1 &= \begin{bmatrix} -0.3 \\ 0.2 \\ 1 \end{bmatrix}, & B_2 &= \begin{bmatrix} 0.1 \\ 0.3 \\ 0.5 \end{bmatrix}, & C_1 &= \begin{bmatrix} 1 & 2 & 1 \\ 2 & 1 & 2 \\ 1 & 4 & 3 \end{bmatrix}, \\ C_2 &= \begin{bmatrix} 2 & 1 & 3 \\ 3 & 1 & 2 \\ 4 & 2 & 1 \end{bmatrix}, & b_1 &= \begin{bmatrix} 0.05 \\ 0.05 \\ 1 \end{bmatrix}, & b_2 &= \begin{bmatrix} 1 \\ -1 \\ 0.5 \end{bmatrix}, & E &= \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, \\ \delta_1 &= 0.1, & W_{11} &= \begin{bmatrix} 0 \\ 0.03 \\ 1 \end{bmatrix}, & W_{21} &= \begin{bmatrix} 0 \\ 0.02 \\ 2 \end{bmatrix}, & E_{11} &= \begin{bmatrix} 0 \\ 0.02 \\ 1 \end{bmatrix}, \\ E_{21} &= \begin{bmatrix} 0 \\ 0.01 \\ 3 \end{bmatrix}, & D_{11} &= \begin{bmatrix} 1 & 2 & 1 \\ 1 & 1 & 2 \\ 2 & 0.2 & 0.4 \end{bmatrix}, & D_{12} &= \begin{bmatrix} 0.1 & 1 & 3 \\ 1 & 2 & 0.3 \\ 0.5 & 4 & 4 \end{bmatrix}, \\ D_{21} &= \begin{bmatrix} 1 & 3 & 1 \\ 3 & 1 & 2 \\ 1 & 0.2 & 0.4 \end{bmatrix}, & D_{22} &= \begin{bmatrix} 1 & 0.1 & 1 \\ 1 & 3 & 2 \\ 2 & 0.2 & 0.4 \end{bmatrix}, & E_{12} &= 0.03, \\ E_{22} &= 0.04. \end{aligned}$$

仿射区域椭圆体系数矩阵分别为:

$$\begin{aligned} F_1 &= 2 \times \frac{C_1^T}{(\beta_1 - \alpha_1)}, & f_1 &= -\frac{\beta_1 + \alpha_1}{\beta_1 - \alpha_1}, \\ F_2 &= 2 \times \frac{C_2^T}{(\beta_2 - \alpha_2)}, & f_2 &= -\frac{\beta_2 + \alpha_2}{\beta_2 - \alpha_2}. \end{aligned}$$

其中: $\alpha_1=3, \beta_1=10, \alpha_2=4, \beta_2=9$ 。

应用 Matlab 7.0 中 LMI 工具箱的 mincx 求解器得到基于上述数值的可行性解, 并结合定理 1 得到一组使闭环系统(9)容许基于观测器的 H_∞ 控制器反馈增益矩阵及观测器增益矩阵:

$$\begin{aligned} K_1 &= [-4.8973 \quad -1.0674 \quad 0.5996], \\ K_2 &= [-5.9530 \quad 6.1058 \quad 9.8335], \\ L_1 &= \begin{bmatrix} 7.8873 & 2.4167 & -4.3368 \\ -2.1354 & 1.7334 & -1.2363 \\ 1.0356 & -0.7336 & 0.0323 \end{bmatrix}, \end{aligned}$$

$$L_2 = \begin{bmatrix} 9.5114 & 2.0544 & -0.4488 \\ -0.7844 & -4.6440 & 7.4455 \\ -5.0556 & -0.1559 & 2.9258 \end{bmatrix}.$$

其中 H_∞ 干扰抑制度 $\gamma=6.5896$ 。

图 3 为根据定理 1 得到的由基于观测器 H_∞ 控制器所构成闭环系统(9)的状态响应曲线。

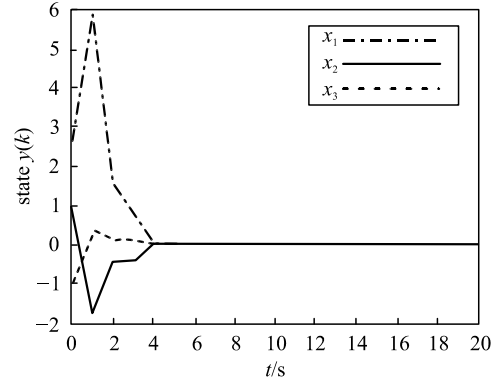


图 3 闭环系统状态响应曲线

图中仿真结果表明: 定理 1 方法可以保证分布式云储能系统在充放电平衡点处可以安全稳定的工作, 且整个系统在渐近稳定的过程中, 扰动 w 到估计误差传递函数的 H_∞ 范数小于给定的常数 γ 。

比较 2 个独立储能单元在各自独立工作和联合工作 2 种模式中的优缺点, 能量来源以及充放电过程能量走向如图 4 所示。

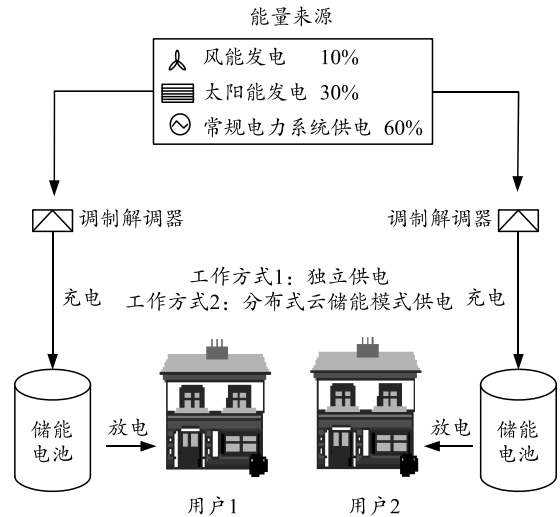


图 4 分布式云储能系统能量循环模式

实验中采用能量密度为 200 Wh/kg 的钴酸锂电池独立供电, 且智能微电网分布式云储能系统由 2 个用户组成。假设 2 个用户在同样条件下获得的风能发电与太阳能发电电量相同, 用户 1 日用电量较大(约 20 kW/h), 用户 2 日用电量较小(约 5 kW/h), 在连续 24 h 内, 测得 2 个用户在充放电过程中能量供应和损耗如图 5 所示。

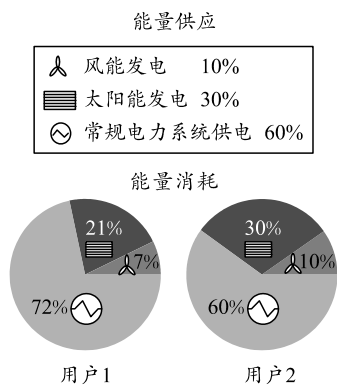


图5 独立供电模式中能耗比例

通过测量，在2个基本储能单元独立供电的情况下，用户1能量总消耗量为20.5 kW/h，其中常规电力系统供电约14.76 kW/h，风能和太阳能供电约5.74 kW/h；用户2能量总消耗量为5.2 kW/h，其中常规电力系统供电约3.12 kW/h，风能和太阳能供电占约2.08 kW/h。由于2个用户风能和太阳能采集条件的一致性，2种能量用户1消耗的总数要大于用户2。通过最终2个用户的能耗比例也可以表明：在采样24 h后，用户1由于用电量较大的原因，在附能提供一样的前提下，多消耗12%的常规电能，造成一定程度上传统能量的损耗，而用户2没有消耗的多余附能又没有能够及时使用，造成能源利用率的降低。如图6所示，进一步采用笔者提出分布式云储能方式协调2个用户的总体用电量，重复上述相同实验。

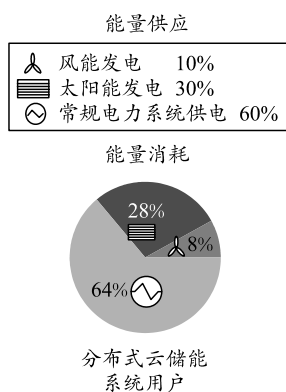


图6 分布式云储能供电模式中能耗比例

由图可知：在2个用户总能耗25.7 kW/h不变的情况下，最终测得常规电力系统供电约16.448 kW/h，占比总能量供应的64%，节约1.43 kW/h。最终结果表明：采用分布式云储能方式协调2个用户的总体用电量行之有效，并且充分利用了可再生能源，节约传统电力系统供电资源，有效地缓解传统电力系统负载压力，有利于环境保护。

理论上，该方法应用范围无穷大，只要整体系

统中的分段子系统符合该类系统的状态空间描述，就可以利用此方法去寻求整体控制策略和指标。但实际上，得到验证的应用范围仅限于10户以内(10用户1月内的各类耗能情况如表1所示)，原因主要在于构造更大规模的系统成本较高，且运行存在困难，希望在今后的实际应用中得到进一步的验证。

表1 10用户单月各类耗能对比 kW/h

方法	常规电力系统耗能	风能耗能	太阳能耗能
应用文中控制方法电网	2 170	1 015	315
传统控制电网	2 485	770	245

由此可见：应用文中控制方法构建的电网使新型能源的利用率更高，同时传统常规电力系统耗能有所下降。

6 结论

笔者针对一类范数有界不确定时变参数广义分布式云储能系统，引入基于观测器的 H_∞ 控制器设计方法。在构造广义分段Lyapunov函数的基础上，应用投影定理以及几个基本引理，设计了使参数不确定离散时间广义分段仿射系统容许的基于观测器的 H_∞ 控制器，保证了由此构成的闭环控制系统具有一定的鲁棒性能。算法以LMIs约束的形式给出了基于观测器 H_∞ 控制器存在的充分条件，并且不包含对系统矩阵的分解，减低了算法的保守性。

对2种供电模式能耗比例的对比结果证明了笔者所提方法的有效性和卓越性。通过分析2种供电模式耗能比例证实：智能微电网分布式云储能供电模式可以合理有效地利用和平衡各类资源，进一步实现充分利用间歇性可再生资源的控制目的。然而，该类系统相关保性能控制以及保成本控制的问题仍需后续相关研究陆续展开，使得分布式云储能系统相关控制技术及应用及开发更加完善。

参考文献：

- [1] 董朝阳, 赵俊华, 文福拴, 等. 从智能电网到能源互联网: 基本概念与研究框架[J]. 电力系统自动化, 2014, 38(15): 1-11.
- [2] 田世明, 栾文鹏, 张东霞, 等. 能源互联网技术形态与关键技术[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(14): 3482-3494.
- [3] 陈启鑫, 刘敦楠, 林今, 等. 能源互联网的商业模式与市场机制(一)[J]. 电网技术, 2015, 39(11): 3050-3056.
- [4] 丁明, 张颖媛, 茆美琴, 等. 包含钠硫电池储能的微网系统经济运行优化[J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(4): 7-14.

[5] 陆晓楠, 孙凯, 黄立培, 等. 孤岛运行交流微电网中分布式储能系统改进下垂控制方法[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(1): 180-185.

[6] 孙孝峰, 郝彦丛, 王宝诚, 等. 微电网分布式储能单元荷电状态平衡和电压恢复[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(15): 4047-4055.

[7] 刘静琨, 张宁, 康重庆. 电力系统云储能研究框架与基础模型[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(12): 3361-3371.

[8] RAHBARI-ASR N, ZHANG Y, CHOW M Y. Consensus-based distributed scheduling for cooperative operation of distributed energy resources and storage devices in smart grids[J]. IET Generation, Transmission & Distribution, 2016, 10(5): 1268-1277.

[9] MORSTYN T, HREDZAK B, AGELIDIS V G. Cooperative multi-agent control of heterogeneous storage devices distributed in a DC microgrid[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2016, 31(4): 2974-2986.

[10] WANG Y, TAN K T, PENG X Y, et al. Coordinated control of distributed energy-storage systems for voltage regulation in distribution networks[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2016, 31(3): 1132-1141.

[11] LI Q F, AYYANAR R, VITTAL V. Convex optimization for DES planning and operation in radial distribution

systems with high penetration of photovoltaic resources[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2016, 7(3): 985-995.

[12] JAYASEKARA N, MASOUM M A S, WOLFS P J. Optimal operation of distributed energy storage systems to improve distribution network load and generation hosting capability[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2016, 7(1): 250-261.

[13] TAN X Q, WU Y, TSANG D H K. Pareto optimal operation of distributed battery energy storage systems for energy arbitrage under dynamic pricing[J]. IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems, 2016, 27(7): 2103-2115.

[14] 李志伟, 赵书强, 刘应梅. 电动汽车分布式储能控制策略及应用[J]. 电网技术, 2016, 40(2): 442-450.

[15] 慈松. 能量信息化和互联网化管控技术及其在分布式电池储能系统中的应用[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(14): 3643-3648.

[16] BOYD S, EL G L, FERON E. Linear matrix inequality in systems and control theory[Z]. SIAM: Philadelphia, PA, 1994.

[17] RODRIGUES L, BOYD S. Piecewise-affine state feedback for piecewise-affine slab systems using convex optimization[J]. Systems and Control Letters, 2005, 54(9): 835-853.

(上接第 44 页)

参考文献:

[1] 范志龙. 基于永磁同步电机的多电机同步控制系统的研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2012.

[2] 彭晓燕, 刘威, 张强. 基于改进型偏差耦合结构的多电机同步控制[J]. 湖南大学学报, 2013(11): 77-83.

[3] 陆梦羽, 张旭秀, 刘影, 等. 基于改进型的交叉耦合双电机同步控制方法[J]. 大连民族大学学报, 2016(5): 470-473.

[4] 潘亮. 基于模糊控制的多电机同步控制方法[D]. 上海:

东华大学, 2016.

[5] 和佳鑫, 成守宇, 方茂瑶. 多堆核电机组控制策略仿真[J]. 兵工自动化, 2018, 37(8): 56-61.

[6] SHI Y, EBERHART R C. Fuzzy adaptive particle swarm optimization[J]. Congress on Evolutionary Computation, 2001, 1(12): 101-106.

[7] 徐晓东. 大型液压源温度控制系统研[D]. 杭州: 浙江大学, 2007.

[8] 高晗瓒, 孙力, 程树康. 采用模糊控制实现的混合式同步电动机闭环控制[J]. 电气传动, 2003(6): 23-27.

[9] 孙怡. 基于模糊 PID 控制的多电机同步控制系统的研究[D]. 上海: 华东理工大学, 2012