



# 基于多变量非线性 DAE 子系统模型的同步发电机励磁汽门综合控制

## 摘要

同步发电机励磁汽门综合控制由多变量非线性 DAE 子系统模型来描述.本文扩展了非线性常微分方程系统的反步控制方法,研究了其镇定控制问题.首先若被控系统的向量相对阶存在,那么可通过一个微分同胚和反馈控制实现系统的解耦和等价转化.然后基于等价系统,利用反步方法设计其镇定控制器,使得整个闭环系统渐近稳定.最后基于 MATLAB 进行了仿真,仿真结果验证了本文所提方法的有效性.

## 关键词

MIMO 微分代数系统;同步发电机;励磁汽门控制;反步

中图分类号 TP13

文献标志码 A

收稿日期 2019-06-10

资助项目 国家自然科学基金(51575283);国家重点研发计划(2017YFD0701201-02)

## 作者简介

陈蓓玉,女,硕士,实验师,研究方向为电力系统分析与控制.chenbeiyu@126.com

- 1 南京信息工程大学 自动化学院,南京,210044
- 2 江苏省大气环境与装备技术协同创新中心,南京,210044

## 0 引言

对于实际电力大系统,被控对象(如元件)往往是电力大系统中的一个非线性微分-代数(Differential-Algebraic Equations, DAE)子系统,受系统其余部分产生的关联输入变量的影响<sup>[1-3]</sup>.针对单输入单输出的非线性 DAE 电力系统,已经有了许多成果.文献[4]将非线性常微分方程(Ordinary Differential Equations, ODE)系统的 Lyapunov 方法扩展到了非线性 DAE 系统,给出了非线性 DAE 系统稳定的充分条件;文献[5]研究了基于非线性 DAE 子系统模型描述的电力系统的可逆性;文献[6]设计了一个多指标的非线性励磁控制律,增强了系统的稳定性,提高了发电机机端电压控制精度;文献[7]建立了多机系统下含 STATCOM 的 DAE 模型并运用目标全息反馈方法,设计出 STATCOM 与励磁的分散协调控制律;文献[8]则针对存在随机扰动情况,研究了带随机扰动抑制的同步发电机励磁控制器设计,实现了系统稳定;文献[9]利用模糊变结构方法,设计了同步发电机的励磁控制器;文献[10]则将反步自适应方法应用于同步发电机励磁控制,实现了对系统未知参数的估计,使得闭环系统稳定.

然而,同步发电机的励磁汽门综合控制问题,却是由多变量非线性 DAE 子系统模型来描述的,其系统内部变量之间以及输入输出之间的非线性耦合关系更为复杂,其控制问题并非单变量情形的简单扩展就能解决,而关于此类控制问题的研究还不多见.文献[11]针对 MIMO 非线性 DAE 系统,扩展了非线性 ODE 系统的微分几何方法,提出了 M 导数、M 括号概念,并将其应用于交直流并联系统非线性控制器设计;文献[12]则研究了 MIMO 非线性 DAE 子系统的逆系统控制方法,提出了一种递归算法,实现了系统的输入输出线性化解耦.

本文扩展了非线性常微分方程系统的反步控制方法,研究了由多变量非线性 DAE 子系统模型来描述的同步发电机励磁汽门综合控制问题.首先若被控系统的向量相对阶存在,那么可通过一个微分同胚和反馈控制,实现系统的解耦和等价转化.接下来基于等价系统,利用反步(backstepping)方法设计出其镇定控制器<sup>[13]</sup>,使得整个闭环系统渐近稳定.最后基于 MATLAB 进行了仿真,仿真结果表明了本文所提方法的有效性.

## 1 系统的数学模型

同步发电机励磁汽门综合控制描述为如下的双输入双输出非线性 DAE 子系统模型<sup>[12]</sup>:

$$\dot{\mathbf{x}} = \begin{pmatrix} \omega - \omega_0 \\ \frac{\omega_0}{H} \left\{ P_H + C_{ML} P_{m0} - \frac{D}{\omega_0} (\omega - \omega_0) - P_e \right\} \\ -\frac{1}{T'_{d0}} [E'_q + (x_q - x'_d) I_d] \\ \frac{1}{T_{H\Sigma}} (-P_H + C_H P_{m0}) \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ \frac{1}{T'_{d0}} \\ 0 \end{pmatrix} E_f + \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ \frac{C_H}{T_{H\Sigma}} \end{pmatrix} U_c \triangleq f(\mathbf{x}, \mathbf{z}, \bar{\mathbf{v}}) + \sum_{i=1}^m s_i(\mathbf{x}, \mathbf{z}, \bar{\mathbf{v}}) u_i,$$

$$\mathbf{0} = \mathbf{g}(\mathbf{x}, \mathbf{z}, \bar{\mathbf{v}}) = \begin{pmatrix} P_t - P_e + r_\alpha (I_d^2 + I_q^2) \\ \theta_U - \delta + \operatorname{arccot} \frac{x_q I_q - r_\alpha I_d}{E'_q - x'_d I_d - r_\alpha I_q} \\ I_t - \sqrt{I_d^2 + I_q^2} \\ Q_t - E'_q I_d + x_q I_q^2 + x'_d I_d^2 \end{pmatrix}, \quad (1)$$

其中微分变量  $\mathbf{x} = (x_1, x_2, x_3, x_4)^T = (\delta, \omega, E'_q, P_H)^T$ ,  $\delta, \omega, E'_q, P_H$  分别表示同步发电机的功角、发电机转子转速、 $q$  轴暂态电势和汽轮机高压缸输出功率;代数变量  $\mathbf{z} = (z_1, z_2, z_3, z_4)^T = (P_t, \theta_U, I_d, I_q)^T$ ,  $P_t, \theta_U, I_d, I_q$  分别为发电机有功、发电机母线电压相角和机端电流的  $d$  轴及  $q$  轴分量;电磁功率方程  $P_e = [E'_q + (x_q - x'_d) I_d] I_q$ ;关联输入变量选取为  $\bar{\mathbf{v}} = (I_t, Q_t)^T$ ,  $I_t, Q_t$  分别为发电机定子电流和发电机无功;控制输入  $\mathbf{u} = (E_f, U_c)^T \triangleq (u_1, u_2)^T$ ,  $E_f, U_c$  分别为励磁电动势和汽门开度;其余的为系统参数.控制输出选取为机端电压与发电机功角:

$$\mathbf{y} = \mathbf{h}(\cdot) = \begin{pmatrix} h_1 \\ h_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} V_t \\ \delta \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \sqrt{P_t^2 + Q_t^2} \\ I_t \\ \delta \end{pmatrix}. \quad (2)$$

可以验证,在发电机正常运行范围内系统(1)满足如下两个性质:

**性质 1** 是指数 1 的,即代数方程  $\mathbf{g}(\cdot)$  关于代数变量  $\mathbf{z}$  的雅克比矩阵具有常满秩:

$$\operatorname{rank} \left( \frac{\partial \mathbf{g}}{\partial \mathbf{z}} \right) = 4, \quad (3)$$

$$\text{其中 } \frac{\partial \mathbf{g}}{\partial \mathbf{z}} = \begin{bmatrix} \frac{\partial g_1}{\partial z_1} & \dots & \frac{\partial g_1}{\partial z_4} \\ \vdots & & \vdots \\ \frac{\partial g_4}{\partial z_1} & \dots & \frac{\partial g_4}{\partial z_4} \end{bmatrix}, \text{以下出现偏微分符号做}$$

类似运算.

**性质 2** 关联输入变量  $\bar{\mathbf{v}}$  及其充分阶次导数均为本地有界可测信号.

在发电机正常运行范围内,  $I_t, Q_t$  及其充分阶次导数  $\dot{I}_t, \dot{Q}_t$  都是本地有界可测的.

本文的目标是对同步发电机多变量非线性 DAE 子系统(1)和(2)设计镇定控制器,使得闭环系统渐近稳定.

## 2 多变量非线性 DAE 子系统的向量相对阶和模型等价转化

### 2.1 非线性 DAE 系统的向量相对阶<sup>[12]</sup>

由式(3)可知  $\left( \frac{\partial \mathbf{g}}{\partial \mathbf{z}} \right)^{-1}$  存在.首先定义符号

$$\mathbf{F}(\mathbf{x}, \mathbf{z}, \bar{\mathbf{v}}) = \begin{bmatrix} \mathbf{I}_n \\ \left( \frac{\partial \mathbf{g}}{\partial \mathbf{z}} \right)^{-1} \frac{\partial \mathbf{g}}{\partial \mathbf{x}} \end{bmatrix}, \quad (4)$$

$$\text{其中 } \mathbf{I}_n \text{ 为 } n \text{ 阶单位矩阵, } \frac{\partial \mathbf{g}}{\partial \mathbf{x}} = \begin{bmatrix} \frac{\partial g_1}{\partial x_1} & \dots & \frac{\partial g_1}{\partial x_4} \\ \vdots & & \vdots \\ \frac{\partial g_4}{\partial x_1} & \dots & \frac{\partial g_4}{\partial x_4} \end{bmatrix}.$$

**定义 1** 称整数向量  $(\gamma_1, \gamma_2, \dots, \gamma_m)$  为子系统(1)和(2)的向量相对阶,若对  $\forall (\mathbf{x}, \mathbf{z}, \bar{\mathbf{v}})$  以及  $i, j = 1, \dots, m, k = 0, \dots, \gamma_i - 2$ ,有如下两个条件成立:

$$(I) L_{F_{s_j}} L_{F_f}^k h_i(\mathbf{x}, \mathbf{z}, \bar{\mathbf{v}}) = 0, \quad (5)$$

其中

$$\begin{cases} L_{F_f}^0 h_i = h_i, \\ L_{F_f}^i h_i \triangleq L_{F_f}(L_{F_f}^{i-1} h_i) \triangleq \left( \frac{\partial L_{F_f}^{i-1} h_i}{\partial \mathbf{x}} \frac{\partial L_{F_f}^{i-1} h_i}{\partial \mathbf{z}} \right) \mathbf{F} \mathbf{f}, \\ L_{F_{s_j}} L_{F_f}^{i-1} h_i = \left( \frac{\partial L_{F_f}^{i-1} h_i}{\partial \mathbf{x}} \frac{\partial L_{F_f}^{i-1} h_i}{\partial \mathbf{z}} \right) \mathbf{F} s_j. \end{cases} \quad (6)$$

(II) 矩阵

$$\mathbf{A}(\mathbf{x}, \mathbf{z}, \bar{\mathbf{v}}) =$$

$$\begin{bmatrix} L_{F_{s_1}} L_{F_f}^{\gamma_1-1} h_1(\mathbf{x}, \mathbf{z}, \bar{\mathbf{v}}) & \cdots & L_{F_{s_m}} L_{F_f}^{\gamma_1-1} h_1(\mathbf{x}, \mathbf{z}, \bar{\mathbf{v}}) \\ L_{F_{s_1}} L_{F_f}^{\gamma_2-1} h_2(\mathbf{x}, \mathbf{z}, \bar{\mathbf{v}}) & \cdots & L_{F_{s_m}} L_{F_f}^{\gamma_2-1} h_2(\mathbf{x}, \mathbf{z}, \bar{\mathbf{v}}) \\ \vdots & & \vdots \\ L_{F_{s_1}} L_{F_f}^{\gamma_m-1} h_m(\mathbf{x}, \mathbf{z}, \bar{\mathbf{v}}) & \cdots & L_{F_{s_m}} L_{F_f}^{\gamma_m-1} h_m(\mathbf{x}, \mathbf{z}, \bar{\mathbf{v}}) \end{bmatrix} \quad (7)$$

是非奇异的.

显然,本文中  $m = 2$ . 可以验证,系统(1)和(2)的向量相对阶存在,为(1,3). 步骤如下:

1) 由式(6)可得:

$$\begin{aligned} L_{F_{s_1}} L_{F_f}^0 h_1 &= \frac{1}{T'_{d0}} (-I_q - c_1 I_d) \frac{P_t(P_t^2 + Q_t^2)^{-\frac{1}{2}}}{I_t} \neq 0, \\ L_{F_{s_2}} L_{F_f}^0 h_1 &= L_{F_{s_2}} h_1(\mathbf{x}, \mathbf{z}, \bar{\mathbf{v}}) = 0, \\ L_{F_{s_1}} L_{F_f}^0 h_2 &= L_{F_{s_2}} L_{F_f}^0 h_2 = 0, \\ L_{F_{s_1}} L_{F_f} h_2 &= L_{F_{s_2}} L_{F_f} h_2 = 0, \\ L_{F_{s_1}} L_{F_f}^2 h_2 &= (\omega_0 I_d [E'_q + (x_q - x'_d) I_d] + \omega_0 I_q c_3 I_d (x_q - x'_d) - \omega_0 I_q (HT'_{d0})) \\ L_{F_{s_2}} L_{F_f}^2 h_2 &= \frac{\omega_0 C_H}{HT_{HS}}. \end{aligned} \quad (8)$$

2) 由式(7)可知这里

$$\mathbf{A}(\cdot) = \begin{pmatrix} \frac{1}{T'_{d0}} (-I_q - c_1 I_d) \frac{P_t(P_t^2 + Q_t^2)^{-\frac{1}{2}}}{I_t} & 0 \\ L_{F_{s_1}} L_{F_f}^2 h_2 & \frac{\omega_0 C_H}{HT_{HS}} \end{pmatrix}. \quad (9)$$

在发电机正常运行范围内,有

$$\det(\mathbf{A}) = \frac{\omega_0 C_H}{T'_{d0}} (-I_q - c_1 I_d) \frac{P_t(P_t^2 + Q_t^2)^{-\frac{1}{2}}}{I_t HT_{HS}} \neq 0. \quad (10)$$

综上,由定义1可知系统(1)和(2)的向量相对阶存在,为(1,3).

## 2.2 非线性 DAE 子系统模型的等价转化

**定理 1** 存在一个微分同胚和一个反馈控制,使得系统(1)和(2)等价转化为如下形式:

$$\begin{cases} \dot{\xi}_{1,1} = r_1, \\ \dot{\xi}_{2,1} = \dot{\xi}_{2,2} + \beta_{2,1}(\cdot), \\ \dot{\xi}_{2,2} = \dot{\xi}_{2,3} + \beta_{2,2}(\cdot), \\ \dot{\xi}_{2,3} = r_2, \\ \boldsymbol{\chi} = \mathbf{0}, \\ y_i = h_i = \xi_{i,1}, \quad i = 1, 2. \end{cases} \quad (11)$$

**证明** 选取如下坐标变换:

$$\begin{cases} \xi_{1,1} = V_t = \frac{\sqrt{P_t^2 + Q_t^2}}{2}, \\ \xi_{2,1} = \delta - \delta_0, \\ \xi_{2,2} = \omega - \omega_0, \\ \xi_{2,3} = \frac{\omega_0}{H} \left\{ P_H + C_{ML} P_{m0} - \frac{D}{\omega_0} (\omega - \omega_0) - P_e \right\}. \end{cases} \quad (12)$$

由式(1)、(8)和(12)可得:

$$\begin{cases} \dot{\xi}_{1,1} = (L_{F_{s_1}} L_{F_f}^0 h_1) u_1 + L_{F_f} h_1 + \beta_{1,1}(\cdot), \\ \dot{\xi}_{2,1} = \dot{\xi}_{2,2} + \beta_{2,1}(\cdot), \\ \dot{\xi}_{2,2} = \dot{\xi}_{2,3} + \beta_{2,2}(\cdot), \\ \dot{\xi}_{2,3} = (L_{F_{s_1}} L_{F_f}^2 h_2) u_1 + (L_{F_{s_2}} L_{F_f}^2 h_2) u_2 + L_{F_f}^3 h_2 + \beta_{2,3}(\cdot), \end{cases} \quad (13)$$

其中

$$\begin{cases} \beta_{1,1} = -\frac{\partial h_1}{\partial \mathbf{z}} \left( \frac{\partial \mathbf{g}}{\partial \mathbf{z}} \right)^{-1} \left( \frac{\partial \mathbf{g}}{\partial \bar{\mathbf{v}}} \right) \dot{\bar{\mathbf{v}}} + \frac{\partial h_1}{\partial \bar{\mathbf{v}}} \dot{\bar{\mathbf{v}}}, \\ \beta_{2,1} = -\frac{\partial h_2}{\partial \mathbf{z}} \left( \frac{\partial \mathbf{g}}{\partial \mathbf{z}} \right)^{-1} \left( \frac{\partial \mathbf{g}}{\partial \bar{\mathbf{v}}} \right) \dot{\bar{\mathbf{v}}} + \frac{\partial h_2}{\partial \bar{\mathbf{v}}} \dot{\bar{\mathbf{v}}}, \\ \beta_{2,2} = -\frac{\partial L_{F_f} h_2}{\partial \mathbf{z}} \left( \frac{\partial \mathbf{g}}{\partial \mathbf{z}} \right)^{-1} \left( \frac{\partial \mathbf{g}}{\partial \bar{\mathbf{v}}} \right) \dot{\bar{\mathbf{v}}} + \frac{\partial L_{F_f} h_2}{\partial \bar{\mathbf{v}}} \dot{\bar{\mathbf{v}}}, \\ \beta_{2,3} = -\frac{\partial L_{F_f}^2 h_2}{\partial \mathbf{z}} \left( \frac{\partial \mathbf{g}}{\partial \mathbf{z}} \right)^{-1} \left( \frac{\partial \mathbf{g}}{\partial \bar{\mathbf{v}}} \right) \dot{\bar{\mathbf{v}}} + \frac{\partial L_{F_f}^2 h_2}{\partial \bar{\mathbf{v}}} \dot{\bar{\mathbf{v}}}. \end{cases} \quad (14)$$

显然选取反馈控制

$$\begin{pmatrix} u_1 \\ u_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} L_{F_{s_1}} L_{F_f}^0 h_1 & L_{F_{s_2}} L_{F_f}^0 h_1 \\ L_{F_{s_1}} L_{F_f}^2 h_2 & L_{F_{s_2}} L_{F_f}^2 h_2 \end{pmatrix}^{-1} \cdot \left( \begin{pmatrix} r_1 \\ r_2 \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} L_{F_f} h_1 \\ L_{F_f}^3 h_2 \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} \beta_{1,1}(\cdot) \\ \beta_{2,3}(\cdot) \end{pmatrix} \right), \quad (15)$$

可将系统(1)和(2)等价转化为

$$\begin{cases} \dot{\xi}_{1,1} = r_1, \\ \dot{\xi}_{2,1} = \dot{\xi}_{2,2} + \beta_{2,1}(\cdot), \\ \dot{\xi}_{2,2} = \dot{\xi}_{2,3} + \beta_{2,2}(\cdot), \\ \dot{\xi}_{2,3} = r_2, \end{cases} \quad (16)$$

其中  $r_1, r_2$  分别是待设计的新的控制项. 证毕.

由定理1,系统(1)和(2)被解耦为两个子系统,便于进一步的控制设计.

## 3 镇定控制器的设计

**定理 2** 若等价系统(11)满足如下结构特性:

$$\beta_{2,i}(\cdot) = \beta_{2,i}(\xi_{2,1}, \dots, \xi_{2,i}, \boldsymbol{\chi}, \bar{\mathbf{v}}, \dot{\bar{\mathbf{v}}}), \quad i = 1, 2, \quad (17)$$

那么系统(1)和(2)是可渐近稳定的.

**证明**

1) 对式(11)中的第1个子系统  $\xi_{1,1} = r_1$ , 显然只

需选取  $r_1 = -c_{1,1}\xi_{1,1}$ ,  $V_1 = \frac{\xi_{1,1}^2}{2}$ , 可得:

$$\dot{V}_1 = -c_{1,1}\xi_{1,1}^2, \quad (18)$$

其中  $c_{1,1} > 0$  是设计参数.

2) 下面利用反步设计方法, 考虑第2个子系统

$$\begin{cases} \dot{\xi}_{2,1} = \xi_{2,2} + \beta_{2,1}(\cdot), \\ \dot{\xi}_{2,2} = \xi_{2,3} + \beta_{2,2}(\cdot), \\ \dot{\xi}_{2,3} = r_2 \end{cases} \quad (19)$$

的镇定控制.

第1步. 定义误差变量

$$e_{2,1} = \xi_{2,1}, \quad e_{2,2} = \xi_{2,2} - \alpha_{2,1}, \quad (20)$$

其中  $\alpha_{2,1}$  为待设计的第1个虚拟控制器. 由式(19)与式(20)可得:

$$\dot{e}_{2,1} = \dot{\xi}_{2,1} = e_{2,2} + \alpha_{2,1} + \beta_{2,1}(\cdot). \quad (21)$$

取 Lyapunov 函数  $V_{2,1} = \frac{e_{2,1}^2}{2}$ , 选取  $\alpha_{2,1} = -c_{2,1}e_{2,1} -$

$\beta_{2,1}(\xi_{2,1}, \mathbf{x}, \bar{\mathbf{v}}, \dot{\bar{\mathbf{v}}})$ , 则有

$$\dot{V}_{2,1} = -c_{2,1}e_{2,1}^2 + e_{2,1}e_{2,2}, \quad (22)$$

其中  $c_{2,1} > 0$  为设计参数.

第2步. 如此继续, 设直到第3个定义误差变量

$$e_{2,3} = \xi_{2,3} - \alpha_{2,2}, \quad (23)$$

其中  $\alpha_{2,2} = -e_{1,1} - c_{2,2}e_{2,2} - \alpha_{2,1} - \beta_{2,2}(\xi_{2,1}, \xi_{2,2}, \mathbf{x}, \bar{\mathbf{v}},$

$\dot{\bar{\mathbf{v}}})$ , 而  $\alpha_{2,1} = \frac{\partial \alpha_{2,2}}{\partial e_{2,1}} e_{2,1} + \sum_{i=1}^2 \frac{\partial \alpha_{2,1}}{\partial \bar{\mathbf{v}}^{(i-1)}} \dot{\bar{\mathbf{v}}}^{(i)}$ .

对第2个闭环误差子系统, 选取 Lyapunov 函数

为  $V_2 = \sum_{i=1}^3 \frac{e_{2,i}^2}{2}$ , 选取  $r_2$  为

$$r_2 = -c_{2,3}e_{2,3} - e_{2,2} + \dot{\alpha}_{2,2}, \quad (24)$$

其中  $\alpha_{2,2} = \sum_{i=1}^2 \frac{\partial \alpha_{2,2}}{\partial e_{2,i}} e_{2,i} + \sum_{i=1}^3 \frac{\partial \alpha_{2,2}}{\partial \bar{\mathbf{v}}^{(i-1)}} \dot{\bar{\mathbf{v}}}^{(i)}$ ,  $c_{2,3} > 0$  为设计参数, 则  $V_{2,3}$  对时间  $t$  导数:

$$\dot{V}_2 = -\sum_{i=1}^3 c_{2,i} e_{2,i}^2. \quad (25)$$

至此, 对整个误差闭环系统取 Lyapunov 函数为

$$V = V_1 + V_2. \quad (26)$$

由式(18)、(25)和(26)可得:

$$\dot{V} = -c_{1,1}\xi_{1,1}^2 - \sum_{i=1}^3 c_{2,i} e_{2,i}^2, \quad (27)$$

可知整个闭环误差系统是渐近稳定的. 证毕.

#### 4 多机电力系统仿真

下面选择图1所示的两区域四机电力系统进行仿真研究, 不妨选取机组 G1 为被控对象.

系统运行方式为: 初始时系统双回线稳态运行, 0.5 s 时线路 7—8 中的一回线  $k$  处 (仿真中  $k=0.1$ ) 发生三相对称接地短路, 故障中的对地电抗为 0.000 1 pu, 0.65 s 故障切除, 系统恢复到初始运行状态. 机组 G1 采用本文所提控制方法, 控制参数选取为  $c_{1,1}=10, c_{2,i}=20, i=1, 2, 3$ . G1 的输出响应如图2和图3所示.

由图2和图3可以看出, 反步镇定控制器取得了良好的控制效果, 保证了发电机功角以及输出机端电压的稳定性, G1 的输出渐近收敛于系统稳态值.

#### 5 结论

本文针对同步发电机多变量非线性 DAE 子系统模型, 通过扩展多变量非线性常微分方程系统的 L 括号、L 导数概念, 实现了系统的解耦和等价转化, 在此基础上运用反步设计方法, 设计其镇定控制器, 使得整个闭环系统渐近稳定. 与孤立多变量非线性

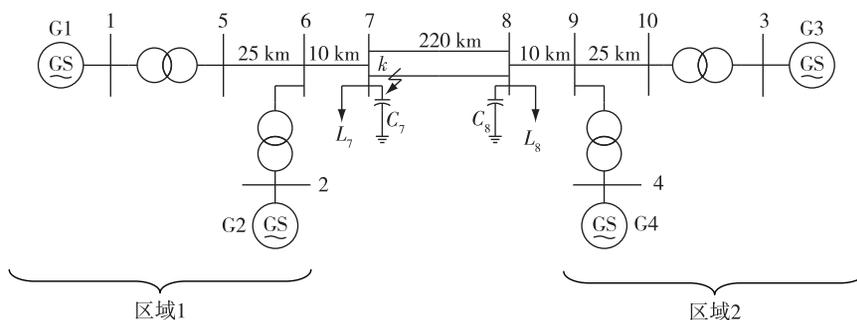


图1 两区域四机电力系统

Fig. 1 Two-area four-machine power system

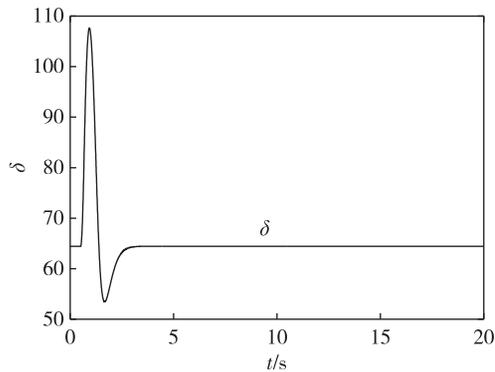


图2  $\delta$ :G1和G4的相对功角

Fig.2  $\delta$ :relative power angle between G1 and G4

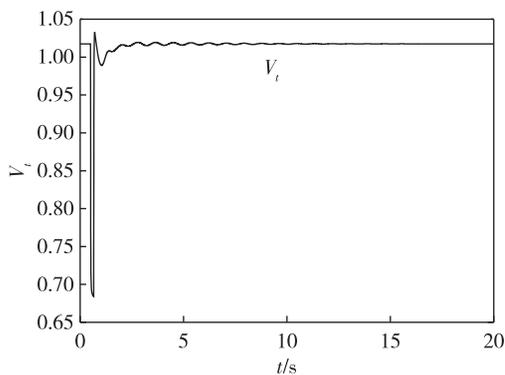


图3  $V_t$ :G1机端电压

Fig.3  $V_t$ :load voltage of G1

DAE系统的精确反馈线性化方法相比,本文的研究结果更具一般性.所提出的模型等价转化方法不仅适用于电力系统,同时也适用于其他领域非线性DAE系统的控制问题研究.

### 参考文献

#### References

[ 1 ] 戴先中,张凯锋.复杂电力系统的接口概念与结构化模型[J].中国电机工程学报,2007,27(7):7-12  
DAI Xianzhong, ZHANG Kaifeng. Interface concept and structural model of complex power systems [ J ]. Proceedings of the CSEE, 2007, 27(7): 7-12

[ 2 ] 戴先中,张凯锋,臧强.基于结构化模型的电力系统元件非线性分散控制方法[J].中国电机工程学报,2008,28(22):15-22  
DAI Xianzhong, ZHANG Kaifeng, ZANG Qiang. Nonlinear decentralized control method of component of power systems based on structural model [ J ]. Proceedings of the CSEE, 2008, 28(22): 15-22

[ 3 ] Hill D J, Mareels I. Stability theory for differential/algebraic systems with application to power systems [ J ]. IEEE Trans on Circuits and Systems, 1990, 37(11): 1416-1423

[ 4 ] 李光远,冯勇.微分代数系统结构化分析[J].控制理

论与应用,2017,34(8):1019-1027  
LI Guangyuan, FENG Yong. Structural analysis of differential algebra system [ J ]. Control Theory and Application, 2017, 34(8): 1019-1027

[ 5 ] Roy T K, Mahmud M A, Shen W X. Robust nonlinear adaptive backstepping excitation controller design for rejecting external disturbances in multimachine power systems [ J ]. International Journal of Electrical Power and Energy Systems, 2017, 84: 76-86

[ 6 ] 李啸骢,郑涛,梁志坚,等.微分代数模型可控制电阻与励磁系统多指标非线性控制[J].电力系统保护与控制,2015,42(16):1-7  
LI Xiaocong, ZHENG Tao, LIANG Zhijian, et al. Differential algebraic model controls multi-index nonlinear control of dynamic resistance and excitation system [ J ]. Power System Protection and Control, 2015, 42(16): 1-7

[ 7 ] 李啸骢,袁辉,陈明媛,等.多机系统中STATCOM与发电机励磁的非线性分散协调控制设计[J].电网技术,2016,40(8):2350-2356  
LI Xiaocong, YUAN Hui, CHEN Mingyuan, et al. Design of nonlinear decentralized coordinated control of STATCOM and generator excitation in multi-machine system [ J ]. Power Grid Technology, 2016, 40(8): 2350-2356

[ 8 ] 彭云建,韩芳墨,陈炯鸿,等.具有随机扰动抑制的同步发电机励磁控制器[J].控制理论与应用,2018,35(4):438-446  
PENG Yunjian, HAN Fangmo, CHEN Jionghong, et al. Synchronous generator excitation controller with random disturbance rejection [ J ]. Control Theory and Application, 2018, 35(4): 438-446

[ 9 ] 陈金,张孝,王平,等.同步发电机非线性励磁系统模糊滑模控制研究[J].自动化仪表,2017,38(10):6-9  
CHEN Jin, ZHANG Xiao, WANG Ping, et al. Research on fuzzy sliding mode control of synchronous generator nonlinear excitation system [ J ]. Process Automation Instrumentation, 2017, 38(10): 6-9

[ 10 ] 李啸骢,陈登义.发电机励磁与SVC的改进自适应反步无源协调控制[J].电力自动化设备,2018,38(12):73-78  
LI Xiaocong, CHEN Dengyi. Improved adaptive backstepping passive coordinated control of generator excitation and SVC [ J ]. Electric Power Automation Equipment, 2018, 38(12): 73-78

[ 11 ] 王杰,陈陈,吴华,等.多机电力系统参数自适应控制的设计理论与方法[J].中国电机工程学报,2002,22(5):5-9  
WANG Jie, CHEN Chen, WU Hua, et al. Design theory and method of parameter adaptive control for multi-machine power system [ J ]. Proceedings of the CSEE, 2002, 22(5): 5-9

[ 12 ] 臧强,胡凯,陈炜峰,等.电力系统元件非线性微分代数子系统模型的逆系统控制:一种新算法[J].南京信息工程大学学报(自然科学版),2017,9(5):560-566  
ZANG Qiang, HU Kai, CHEN Weifeng, et al. Inverse system control of nonlinear differential-algebraic subsystem model for power system components: a new al-

gorithm[J]. Journal of Nanjing University of Information Science and Technology (Natural Science Edition), 2017, 9(5): 560-566

- [13] 臧强, 张凯峰, 戴先中. 非线性微分代数子系统的反步控制及应用[J]. 系统工程与电子技术, 2013, 35(8):

1736-1741

ZANG Qiang, ZHANG Kaifeng, DAI Xianzhong. Backstepping control and application of nonlinear differential algebra subsystem[J]. Systems Engineering and Electronics, 2013, 35(8): 1736-1741

## Excitation and valve control of synchronous generator based on multi-variable nonlinear differential-algebraic subsystem model

CHEN Beiyu<sup>1,2</sup> YUE Hua<sup>1,2</sup> TU Zhuang<sup>1,2</sup>

1 School of Automation, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044

2 Jiangsu Collaborative Innovation Center on Atmospheric Environment and Equipment Technology, Nanjing 210044

**Abstract** The excitation and valve control of synchronous generator is described by a multi-variable nonlinear differential-algebraic subsystem model. A stabilization controller is designed based on backstepping control method for such systems. Firstly, if the vector relative degree exists, then the controlled systems can be decoupled and transformed equivalently by a diffeomorphism and a feedback control. Then the backstepping method is adopted for the equivalent system to design the stabilization controller, through which the whole closed-loop systems is made asymptotically stable. Finally the simulation is conducted based on MATLAB, and the results show the validity of the method proposed in this paper.

**Key words** MIMO differential algebraic system; synchronous generator; excitation and valve control; backstepping